



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

**VÝPOČET STABILITY SVAHŮ HRÁZÍ
MALÝCH VODNÍCH NÁDRŽÍ**

SLOPE STABILITY CALCULATIONS FOR SMALL DAMS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jindřich Hajda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. JAROMÍR ŘÍHA, CSc.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodních staveb

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Jindřich Hajda
Název	Výpočet stability svahů hrází malých vodních nádrží
Vedoucí práce	prof. Ing. Jaromír Říha, CSc.
Datum zadání	31. 3. 2016
Datum odevzdání	13. 1. 2017
V Brně dne 31. 3. 2016	

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

ČSN 75 2310 Sypané hráze.

ČSN 75 2410 Malé vodní nádrže.

BROŽA, V. - KRATOCHVÍL, J. - PETER, P. - VOTRUBA, L. 1987. Přehrady. SNTL/ALFA. Praha. 546 s.

KÉZDI, Á. 1964. Bodenmechanik. Band 2. Verlag für Bauwesen, Berlin, 459 p.

MYSLIVEC, A. – EICHLER, J.- JESENÁK, J. 1970. Mechanika zemin, SNTL Praha.

ŠIMEK, J. – JESENÁK, J. – EICHLER, J. – VANÍČEK, I. 1990. Mechanika zemin, SNTL Praha, 387 s.

TANČEV, L. 2005. Dams and Appurtenant Hydraulic Structures. Balkema Publishers, London, 838 p.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Předmětem práce budou parametrické výpočty stability svahů sypaných hrází malých vodních nádrží, a to pro různé typy zemin a různé sklony svahů. Cílem bude provést porovnání bezpečnostní rezervy pro sklony svahů uvedené v ČSN 75 2410 Malá vodní nádrže pro vybrané typy hrází a jejich materiálové složení.

Řešení bude provedeno ve variantách homogenních a nehomogenních hrází.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

prof. Ing. Jaromír Říha, CSc.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

V České republice existuje asi 20 000 malých vodních nádrží. Jedná se o velké množství především rybníků, či malých retenčních nádrží, které nás chrání proti povodním. O hrázích těchto nádrží toho nevíme mnoho. Co se týká stability tělesa hráze, nynější norma ČSN 75 2410 předepisuje především sklony návodních a vzdušných svahů pro jednotlivé materiály, či nutný výpočet stability od 6m výšky hráze.

Mnohé z těchto hrází jsou však stabilní i navzdory tomu, že nesplňují nároky předepsané normou, jelikož byly postaveny dávno předtím, než byla nějaká norma vůbec vydána.

Tato práce se zabývá určením rezervy stupně bezpečnosti pro parametrické studie pěti homogenních a tří nehomogenních hrází. Výpočet byl proveden pomocí metody redukce parametrů smykové pevnosti programem Plaxis 2D.

Výpočet stupně bezpečnosti bude proveden celkem pro 4 typické zatěžovací stavy.

KLÍČOVÁ SLOVA

malá vodní nádrž, zemní hráz, ČSN 75 2410, Plaxis 2D, stupeň bezpečnosti

ABSTRACT

There are approximately 20 000 small dams in the Czech Republic. This number entails many ponds or small flood attenuation reservoirs, which provide protection against floods. We do not know much about the structure and material properties of these earth dikes. Concerning the small dam stability the current technical standard ČSN 75 2410 focuses foremost on the angle of both the upstream and downstream slopes in case of different materials, and the method of the stability assessment in case of a dam height being 6m or more.

Most of these earth dikes are still standing in spite not being built according to any technical standards. They do not follow any standards mostly because they were built before the modern technical standards were published.

This diploma thesis focuses on assigning the degree of a reserve in the safety factor for studies of 5 homogeneous earth dikes and 3 inhomogeneous earth dikes. The calculation was done using the Plaxis 2D software using to the shear strength reduction method.

The Calculation of the safety degree is made for 4 typical load cases.

KEYWORDS

small dam, earth dike, ČSN 75 2410, Plaxis 2D, safety factor

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Jindřich Hajda *Výpočet stability svahů hrází malých vodních nádrží*. Brno, 2017. 70 s., 96 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce prof. Ing. Jaromír Říha, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 3. 1. 2017

Bc. Jindřich Hajda
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Za podnětné připomínky a rady k mé práci tímto děkuji vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Jaromíru Říhovi, CSc. Za pomoc při studiu programu Plaxis 2D děkuji panu Ing. Janu Vrublovi z VUT Fast Brno.

Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu při studiu na vysoké škole.

OBSAH:

1	ÚVOD.....	10
1.1	Všeobecně	10
1.2	Současný stav poznání	10
1.3	Předmět a Cíle práce	11
2	TEORETICKÁ VÝCHODISKA.....	12
2.1	Napjatost.....	12
2.1.1	Napjatost v bodě	12
2.1.2	Podmínky rovnováhy	13
2.1.3	Fyzikální rovnice	14
2.1.4	Geometricko-deformační vztahy	15
2.1.5	Okrajové podmínky	16
2.1.6	Numerické řešení	16
2.1.7	Poznámky k napjatosti	17
2.2	Rovinný problém.....	20
2.2.1	Vztahy pro rovinný problém.....	21
2.3	Pevnost zemín	22
2.3.1	Pevnost.....	22
2.3.2	Efektivní napětí.....	25
2.3.1	Tlak vody v pórech zeminy a jeho stanovení.....	26
2.4	Metody výpočtu stupně bezpečnosti	27
2.4.1	Metody mezní rovnováhy	27
2.4.2	Metoda redukce parametrů smykové pevnosti.....	29
2.5	Program Plaxis 2D	31
2.5.1	Historie:	31
2.5.1	Moduly programu	32
2.5.2	Popis programu	32
2.5.3	Posloupnost kroků matematického modelování.....	36
3	POŽADAVKY NA STABILITU SVAHŮ ZEMNÍCH HRÁZÍ.....	37
3.1	Výběr zeminy.....	37
3.2	Geometrie hrází.....	39
3.3	Stupně bezpečnosti.....	41
4	POSTUP ŘEŠENÍ.....	42
4.1	Geometrie hrází.....	42
4.2	Použité materiály	45
4.2.1	Materiály použité při modelování hrází	45
4.2.2	Materiál použitý při modelování drénu.....	49
4.2.3	Materiál použitý při modelování podloží.....	49

4.3	Zatěžovací stavy	51
4.4	Výpočetní model.....	53
4.4.1	Okrajové podmínky	53
4.4.2	Geometrie hrází	53
4.4.3	Materiálové charakteristiky	53
4.4.4	Sít' mesh.....	54
4.4.5	Hydraulické podmínky	54
5	VÝSLEDKY ŘEŠENÍ	55
5.1	Členění příloh.....	55
5.2	Obsah příloh.....	55
5.3	Výsledky práce	56
5.3.1	I. Zatěžovací stav	56
5.3.2	II. Zatěžovací stav	56
5.3.3	III. Zatěžovací stav	56
5.3.4	IV. Zatěžovací stav	56
6	ZÁVĚŘ A DISKUZE.....	58
7	ZDROJE	64
	SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	66
	SEZNAM TABULEK	67
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	68
	SEZNAM PŘÍLOH	69

1 ÚVOD

1.1 VŠEOBECNĚ

Malé vodní nádrže jsou příslušnou normou ČSN 75 2410 definovány dvěma podmínkami:

1) Objem nádrže po hladinu ovladatelného prostoru (normální hladinu) není větší než 2 mil. m³.

2) Největší hloubka nádrže nepřesahuje 9 m. [ČSN 75 2410, 2011]

V České republice se nachází cca 20 000 malých vodních nádrží (MVN), které jsou různého stáří a různého technického stavu. Jedná se většinou o velkou spoustu rybníků či záchytných retenčních nádrží, které slouží k ochraně proti povodním.

V současné době pro návrh hrází těchto malých nádrží existuje řada publikací a také norma ČSN 75 2410, která udává doporučené sklony svahů hrází pro jednotlivé materiály. Pro dnes navrhované hráze je totiž nutný statický výpočet až od 6m výšky hráze.

V minulosti byly tyto hráze stavěny bez normových doporučení, často i se strmějším sklonem než dnešní norma doporučuje. Některé hráze, především starých rybníků, přetrvaly staletí bez větších problémů se stabilitou, i když podle dnešní normy sklony jejich svahů nevyhovují.

Problémem, zejména u suchých hrází, jsou především povodně a kritické stavy, kdy potřebujeme mít nádrž rychle vyprázdněnou. Jsme schopni zhruba předvídat, jak se budou hráze chovat, ale nejsme si zcela jisti, jakou rychlost prázdnění hráze ještě snesou.

1.2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

V minulosti se patrně u návrhu hrází vycházelo především ze zkušeností stavitele, popřípadě se braly sklony hrází, které už někde existovaly a nevykazovaly známky nestability. Příkladem mohou být hráze Třeboňských rybníků.

Ve 20. století došlo k prudkému rozvoji všech vědních disciplín, takže i pro stavebnictví začaly vznikat určité standardy. První sklony svahů v tehdejší Československu byly popsány v normě ČSN 73 6824 z roku 1964 – Nízké sypané nádrže. V této normě již byly obsaženy kromě doporučených sklonů svahů i určité parametry různých zemin, ze kterých je možné přehrady budovat.

Ze staré normy se sklony svahů přenesly do i do nové ČSN 75 2410. Orientační vlastnosti zemin jsou mírně rozdílné a byly pravděpodobně změněny na stranu bezpečnosti u jílových zemin. Bohužel se již nepodařilo zjistit, podle čeho byly sklony svahů v těchto normách voleny. Dá se předpokládat, že byly voleny dle zkušenosti s určitou rezervou na stranu bezpečnosti.

Obecně můžeme při návrhu vycházet z normy ČSN EN 1997-1. V této normě jsou obsaženy požadavky pevnosti, stability, použitelnosti a trvanlivosti konstrukcí.

Další doporučení jsou v normě ČSN 75 2410. V této normě se jedná především o doporučené sklony svahů pro jednotlivé materiály. Doporučené normové sklony svahů lze využít za podmínek, které norma jasně definuje - odvodnění tělesa hráze a podloží (nesmí docházet k výsakům vody na povrch vzdušního svahu), materiál hráze musí být předepsaně hutněn a podloží hráze musí mít dostatečnou smykovou pevnost.

Obecně se pro návrh hráze doporučuje provést výpočet stupně bezpečnosti například pomocí metod mezní rovnováhy. Tyto metody vychází ze stavu na mezi porušení, skutečný stav se poté s tímto stavem srovnává [Říha, 2008]. Mezi nejznámější metody mezní rovnováhy patří Felleniova (Petterssonova), Bishop, Morgenstern-Price, Spencer a metoda Jambu.

Výpočet pomocí těchto metod je zatížen nejistotou, jelikož nemusí postihnout tvar a umístění kritické smykové plochy pro nejnižší stupeň bezpečnosti. Podrobnější popis metod mezní rovnováhy, je umístěn v teoretické přípravě v kapitole (2.4).

Další z možností je postup založený na redukci parametrů smykové pevnosti [Dawson et al, 1999]. Tuto metodu nelze aplikovat při klasickém ručním výpočtu. Proto se pro výpočet pomocí této metody využívá metody konečných prvků [Kolář et al., 1979], [Zienkiewicz, Corneau, 1974].

Více se o navrhování, doporučeních a metodách výpočtu stupně bezpečnosti můžeme dočíst v zahraničních podkladech například [Tančev, 2014], [Lewis, 2014], [Goldin, Rasskazov, 1992], [Fell, 2015], [Design, 1987].

1.3 PŘEDMĚT A CÍLE PRÁCE

Cílem této diplomové práce bylo stanovit bezpečnostní rezervu stability svahů pro pět vybraných typů homogenních hrází a tří nehomogenních hrází MVN různého uspořádání vycházejícího z ČSN 75 2410. Pro všechny vybrané varianty hrází MVN byla stabilita vyhodnocena prostřednictvím stupně bezpečnosti, metodou redukce parametrů smykové pevnosti v programu Plaxis 2D.

V první části se práce zabývala úvodem do problematiky, teoretickou přípravou a popisem výpočtu v programu Plaxis 2D.

V další části práce byl proveden výběr materiálových vlastností pro jednotlivé hráze a výpočet stupně bezpečnosti pro 4 zatěžovací stavy.

1. Z.S. – Prázdná nádrž
2. Z.S. – Plná nádrž (hladina 1m pod korunou hráze) ustálené proudění
3. Z.S. – Pomalé prázdnění (Pokles hladiny v nádrži o 1m/den, celkový pokles 7m/7dní)
4. Z.S. – Rychlé prázdnění (Pokles hladiny o 7m/den)

Po výpočtu stupně bezpečnosti, byly pro každý typ hráze vytvořeny tyto přílohy:

- Vzorový řez hrází, který obsahuje výpis použitých materiálů a základní kóty.
- Matematický model s vyznačením sítě konečných prvků.
- Stav piezometrických výšek vody v hrázi při II., III. a IV zatěžovacím stavu.
- Ukázka vytvořené smykové plochy pro jednotlivé stupně bezpečnosti.

2 TEORETICKÁ VÝCHODISKA

Tato práce se opírá o základní znalosti z předmětů jako mechanika zemin a hydraulika podzemních vod. Základními termíny použitými v této kapitole jsou napjatost, hladina podzemní vody, pevnost zemin.

2.1 NAPJATOST

Napětí je veličina, pomocí které je charakterizován určitý stav kontinua po silovém působení. K popisu chování pružného tělesa je v každém jeho bodě potřeba znát či jinak získat hodnoty celkem 15 neznámých veličin a to:

3 Složky posunutí u

6 Složek poměrných přetvoření ε

6 Složek napětí σ

Pro vypočtení těchto složek je potřeba sestavit 15 rovnic:

3 Podmínky rovnováhy

6 Geometrických

6 Fyzikálních

2.1.1 Napjatost v bodě

Vektor posunutí

Každé posunutí libovolného bodu tělesa uvnitř prostoru můžeme popsat vektorem posunutí. Tento vektor má tři navzájem kolmé složky u , v , w . Tyto složky můžeme zapsat v jednom vztahu a to jako *vektor posunutí* u .

$$u = \{u, v, w\}^T \quad (2.1)$$

Vektor poměrných přetvoření

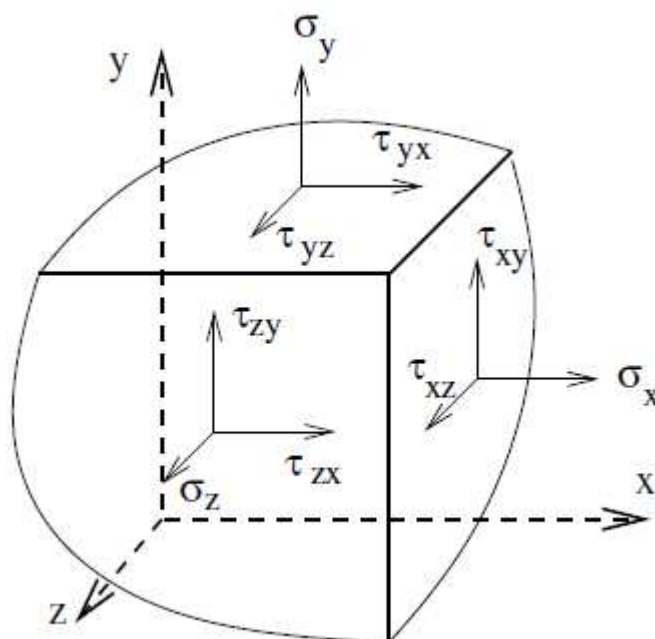
Během působení napětí na těleso vznikají poměrné přetvoření. Při působení normálového napětí σ_i vzniká prodloužení nebo zkrácení. Při působení smykového napětí vzniká zkosení γ_{ij} . Všechny poměrné deformace je tedy možné zapsat ve *vektoru poměrných deformací*.

$$\varepsilon = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}\}^T \quad (2.2)$$

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – Popisují poměrná přetvoření ve směru os kartézských souřadnic

$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$ - Tyto členy mají význam poměrných úhlových změn tzv. zkosení

Vektor napětí



2.1 Napětí v bodě [Brožovský, 2012]

Na obrázku 2.1 je možno vidět jednotlivá napětí v bodech tělesa. Pro názornost je na obrázku znázorněna část elementu, zobrazení tedy není zcela přesné. Můžeme si povšimnout především normálových napětí σ_x , σ_y a σ_z . Tato působí ve směrech hlavních os systému. Dále jsou zde obsažena napětí smyková. Tato napětí naproti normálovým působí rovnoběžně s osami v rovinách xy , yz , zx .

Uplatněním předpokladu o vzájemnosti smykových napětí lze považovat jen tři smyková napětí za nezávislá τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} . [Brožovský, 2015]

$$\begin{aligned}\tau_{xy} &= \tau_{yx} \\ \tau_{yz} &= \tau_{zy} \\ \tau_{zx} &= \tau_{xz}\end{aligned}\tag{2.3}$$

Dále budeme uvažovat pouze přítomnost tří normálových napětí a tří nezávislých smykových napětí. Tato napětí mohou být zapsána ve formě *vektoru napětí* σ .

$$\sigma = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}\}^T\tag{2.4}$$

2.1.2 Podmínky rovnováhy

Suma sil působících na těleso je rovna nule. Vychází z 2. Newtonova pohybového zákona, zákona síly.

$$\begin{aligned}\Sigma F_{x,i} &= 0 \\ \Sigma F_{y,i} &= 0 \\ \Sigma F_{z,i} &= 0\end{aligned}\tag{2.5}$$

Na diferenciálním objemu mají tyto rovnice tvar:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + X &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + Y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z &= 0\end{aligned}\quad (2.6)$$

X – Objemové zatížení v ose X

Y – Objemové zatížení v ose Y

Z – Objemové zatížení v ose Z

2.1.3 Fyzikální rovnice

Fyzikálními rovnicemi jsou nazývány vztahy mezi napětími a poměrnými deformacemi. V 1D se předpokládají velmi malé deformace, které se dají popsat pomocí Hookova zákona.

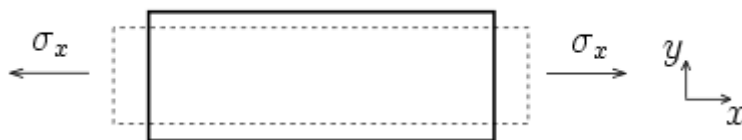
$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \quad (2.7)$$

ϵ_x – Poměrná deformace v ose x

σ_x – Normálové napětí v ose x

E – Modul pružnosti materiálu

Tento zápis Hookova zákona však platí pouze pro jednorozměrné úlohy (při tažení či tlačení prutu). Tento vztah ale nepočítá se změnou průřezu během deformace. Je zavedeno zjednodušení, že plocha se během deformace nemění. Platí hlavně u lineárně pružných deformací, zemina je ale pružně plastický materiál. [Brožovský, 2015]



2.2 Změna průřezu při působení síly [Wikipedie]

Na obrázku je prodloužení tělesa znázorněno čárkováním. Můžeme vidět, že k určité deformaci zkoumaného tělesa skutečně dochází. Poměr mezi podélnou a příčnou změnou délky tělesa je proto popsán *Poissonovým součinitelem* ν . Velikost poměrného prodloužení ϵ_x nebude tedy záviset pouze na napětí σ_x ale i na napětí ve směrech y a z . [Brožovský, 2015]

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \left[\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z) \right] \quad (2.8)$$

ε_x – Poměrné přetvoření v ose x

E – Modul pružnosti materiálu

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – Normálové napětí ve směrech x, y, z

ν – Poissonův součinitel

Pro smyková napětí se vychází z předpokladu, že vztah mezi smykovým napětím τ_{ij} a zkosením γ_{ij} bude lineární.

$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{2G} \quad (2.9)$$

γ_{yz} – Zkos

τ_{yz} – Smykové napětí

G – Modul pružnosti ve smyku

Z těchto dvou vztahů se dají odvodit fyzikální vztahy pro pružné těleso v prostoru a můžeme proto napsat:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} \left[\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z) \right], \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{2G} \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} \left[\sigma_y - \nu (\sigma_x + \sigma_z) \right], \gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{2G} \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} \left[\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y) \right], \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{2G} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Nechová-li se materiál lineárně pružně, musí tyto vztahy projít úpravami. Nejčastější úpravou je nahrazení těchto vztahů vztahy pružno-plastickými.

2.1.4 Geometricko-deformační vztahy

Udávají vztah mezi posuny a poměrnými přetvořeními.

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}, \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y}, \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z}, \end{aligned} \quad (2.11)$$

Smykové deformace neboli zkosení:

$$\begin{aligned}
\gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \\
\gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \\
\gamma_{zx} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z},
\end{aligned}
\tag{2.12}$$

Uvedené soustavy rovnic jsou v obecném případě velmi obtížně řešitelné. Většinou se veškeré tyto úlohy řeší numericky pomocí metody sítí, nebo metody konečných prvků.

2.1.5 Okrajové podmínky

Pro tuto soustavu patnácti parciálních diferenciálních rovnic musí vyhovovat napjatost deformovaného tělesa. Jako každé soustavy rovnic i tyto soustavy mají nekonečně mnoho řešení. Abychom našli správné řešení soustavy rovnic, musíme aplikovat okrajové podmínky, které musí toto řešení splňovat. Pro tyto rovnice určujeme tři druhy základních okrajových podmínek a to podmínky:

- Geometrické
- Statické
- Smíšené

Geometrické

Někdy jsou nazývány kinematickými okrajovými podmínkami. Tyto okrajové podmínky popisují geometrickou vazbu tělesa na jeho okolí. Na okrajích tělesa se dají popsat hodnotami vektoru posunutí u , v , w . Například zadané posuny ve směru osy x jsou nulové, ($u(0)$ – posun v bodě 0 je nulový).

$$\begin{aligned}
u(0) &= 0 \\
u(x) &= 0
\end{aligned}
\tag{2.13}$$

Statické okrajové podmínky

Někdy také nazývány silovými okrajovými podmínkami. Tyto okrajové podmínky popisují statické vazby mezi tělesem a jeho okolím. Definují napjatost na povrchu tělesa. V případě statických podmínek jsou předepsány složky vektorů vnějšího zatížení.

Smíšené okrajové podmínky

Platí, když jsou na okrajích tělesa předepsány zároveň statické i geometrické okrajové podmínky. Tyto okrajové podmínky, které popisují jak statickou tak geometrickou vazbu tělesa na okolí nazýváme smíšenými okrajovými podmínkami.

2.1.6 Numerické řešení

Jak bylo uvedeno výše, tyto soustavy rovnic jsou v obecném případě velmi obtížně řešitelné. Ke snazšímu řešení a zrychlení výpočtu přispívají programy, které tyto rovnice řeší numericky pomocí různých metod.

Metoda konečných diferencí (Finite difference method)

Metoda konečných diferencí se někdy také nazývá metodou sítí. Princip metody je postaven na diskretizaci parciálních diferenciálních rovnic, které popisují daný problém.

Rovnice jsou diskretizovány v prostoru. Hledané řešení se tedy nachází v konečném množství prostorových bodů.

Jestli pracujeme přímo s parciálními diferenciálními rovnicemi, nazýváme řešení tzv. *silnou formulací*.

Řešení, kdy pracujeme s integrací přes plochu prvku, se nazývá *slabá formulace*. S tímto řešením pracuje například metoda konečných prvků.

Při řešení této metody použijeme jako výpočetní síť pravidelné rozdělení oblasti podle bodů na obdélníkové tvary. Velmi vhodná je tato metoda především pro řešení 1D problémů, i když někdy je pro svou snadnou implementaci využita i pro řešení 2D problému.

Více o této metodě můžeme nalézt v práci [Courant, R. Friedrichs, K. Lewy, H. 1967 (1928)].

Metoda konečných prvků (Finite element method)

Vznik metody se přičítá potřebě řešit složité úkoly pružnosti a strukturální analýzy.

Počátky této metody můžeme vysledovat u prací Alexandra Hrennikoffa a Richarda Couranta. Práce obou pánů, se od sebe sice lišily, měly však společnou jednu zásadní věc a to rozdělení oblasti do samostatných elementů. Hrennikoff (1941) využíval mřížky, zatímco Courant (1928) užíval konečné množství trojúhelníkových elementů.

Jedná se o metodu modelování chování kontinua. Neznámými jsou posuny daných bodů, (uzlů) v síti (mesh). Rovina (pokud je jedná o 2D úlohu) nebo prostor (3D úloha) jsou rozděleny na prvky (elements). V rovině se nejčastěji jedná o trojúhelníky, ze kterých se utvoří síť (mesh). Poté je řešena soustava n lineárních rovnic.

Nejčastěji používané varianty metody konečných prvků jsou:

1. Deformační metoda – pes 90% případů nejčastější metoda
2. Silová
3. Smíšená

Program PLAXIS 2D využívá deformační metodu konečných prvků. Více o metodě konečných prvků je možno nalézt v publikacích [Kolář et al., 1979], [Zienkiewicz, Corneau, 1974].

2.1.7 Poznámky k napjatosti

Hlavní napětí

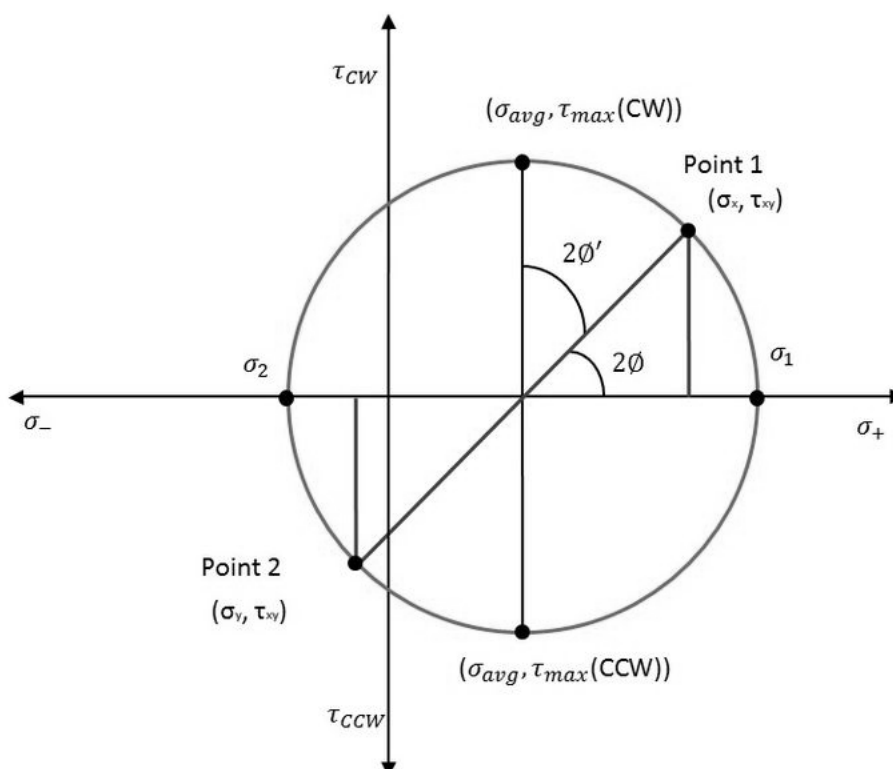
V obecném bodě zatíženého tělesa existují vždy tři k sobě kolmé plochy, na nichž jsou tečná (neboli smyková) napětí nulová a normálová nenulová. Tato napětí se nazývají hlavní, a roviny, na nichž působí, se nazývají hlavní roviny. Na hlavní rovině vždy působí hlavní napětí totožné s výsledným napětím.

Smyková napětí

Na všechny plochy sledovaného tělesa působí napětí, které se dá rozložit na normálovou a smykovou složku. Smyková napětí vznikají tedy ve všech plochách kromě ploch hlavních.

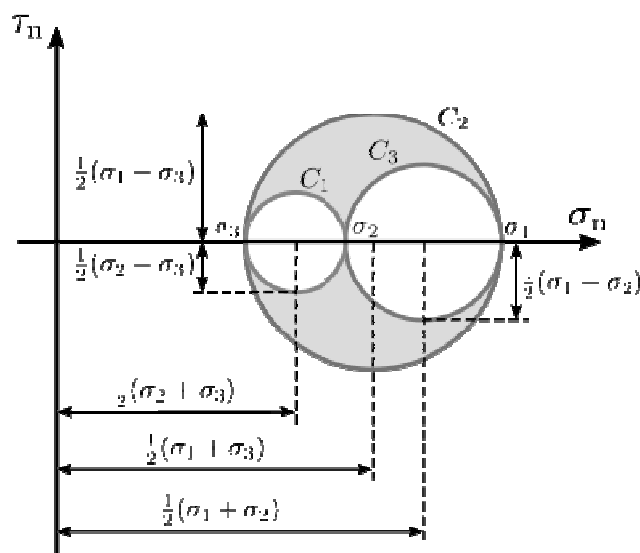
Mohrova kružnice

Napjatost v zemině se dá vyjádřit Mohrovou kružnicí. Pomocí této kružnice se znázorňuje stav napjatosti bodu v rovině. Na vodorovnou osu se vynášejí normálová napětí na svislou osu smyková. Z této kružnice lze geometricky stanovit velikosti hlavních napětí $\sigma_1 = \sigma_{max}$ a $\sigma_2 = \sigma_{min}$.



2.3 Mohrova kružnice [Srinivas, 2015]

Každá napjatost v prostoru je obecně charakterizována třemi hlavními napětími a tedy i třemi Mohrovými kružnicemi. Tyto kružnice tvoří úplný Mohrův diagram. Úplný Mohrův diagram se dá přenést do roviny, jak vidíme na tomto obrázku.



2.4 Úplný Mohrův diagram [Wikipedie, 2009]

Invarianty napětí

Je to vztah mezi složkami napětí nezávislý na poloze zvolené soustavy souřadnic. Během výpočtu hlavního napětí při prostorové napjatosti se pro libovolně daný systém souřadnic odvodí tři základní rovnice mezi složkami napětí a hlavními napětími $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$. Když máme vyjádřen invariant, můžeme počítat různé napětí, které jsou na sebe kolmé. Součet těchto napětí se bude vždy rovnat součtu hlavních napětí na prvku.

Rovnici lze rozepsat pomocí invariantu takto:

$$\sigma^3 - I_1 \sigma^2 + I_2 \sigma - I_3 = 0 \quad (2.14)$$

I_1 – I. Invariant napětí

I_2 – II. Invariant napětí

I_3 – III. Invariant napětí

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (2.15)$$

$$I_2 = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{yz} & \sigma_z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_z & \tau_{xz} \\ \tau_{zx} & \sigma_x \end{vmatrix} = \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_x + \sigma_z \sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2 \quad (2.16)$$

$$I_3 = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{vmatrix} = \sigma_x \sigma_y \sigma_z - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{zx}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2 + 2 \tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} \quad (2.17)$$

Řešením rovnic získáme velikosti hlavních napětí, pro které platí $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. V každém bodě tělesa tedy existují právě tři hlavní napětí působící na tři vzájemně kolmé plochy. Invarianty I_1, I_2 a I_3 nezávisí na volbě souřadného systému. Tenzor napětí má tedy ve směrech hlavních napětí tvar:

$$[A_\sigma] = \begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{vmatrix} \quad (2.18)$$

Rovnice příslušných invariantů v daném souřadném systému x, y, z ve směrech hlavních napětí jsou:

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (2.19)$$

$$I_2 = \begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_2 & 0 \\ 0 & \sigma_3 \end{vmatrix} = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3 \quad (2.20)$$

$$I_3 = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{vmatrix} = \sigma_x\sigma_y\sigma_z - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{zx}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2 + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} \quad (2.21)$$

I_1 – I. Invariant napětí

I_2 – II. Invariant napětí

I_3 – III. Invariant napětí

Deviátor napětí

Deviátor napětí je průměr Mohrovy kružnice. Deviatory napětí jsou tedy rozdílem hlavních napětí $\sigma_1 - \sigma_3, \sigma_1 - \sigma_2, \sigma_2 - \sigma_3$.

Plasticita

Z praktických zkoušek je známo, že zemina není materiálem pružným, ale pružně plastickým, proto je na místě zmínit se o plasticitě těles.

Teorie plasticity popisuje schopnost látky deformovat se bez porušení nevratným tvárným způsobem. Zkoumaná tělesa proto zůstávají po odtížení alespoň částečně přetvořena, nebo v nich zůstávají zbytková napětí.

$$\sigma = E \cdot (\varepsilon - \varepsilon_p - \varepsilon_c) \quad (2.22)$$

σ – Normálové napětí

E – Modul pružnosti

ε – Celkové přetvoření

ε_p – Plastické přetvoření

ε_c – Creepové přetvoření

2.2 ROVINNÝ PROBLÉM

Rovinným problémem se zpravidla označují tyto tři úlohy:

- Rovinná napjatost
- Rovinná deformace
- Rotační symetrie těles

Nejdůležitějšími z této kapitoly jsou však rovinná napjatost a rovinná deformace, pro tuto diplomovou práci především však rovinná deformace. Další část se tedy bude věnovat přímo této problematice.

Rovinná deformace

Pro tyto úlohy se nejlépe hodí dlouhá přímá tělesa, která jsou po délce podepřena neměnným způsobem, například liniové stavby jako silnice nebo železnice. Idealizace této deformace spočívá v tom, že těleso je nekonečně dlouhé a po délce podepřené. Po této idealizaci je tedy možné říct, že těleso má jednotkovou tloušťku a je vhodné pro dvojrozměrnou úlohu. Při této dvourozměrné úloze můžeme tedy pracovat s posunutími pouze v rovině xy . [Brožovský, 2015]

$$u = \{u, v\}^T \quad (2.23)$$

Předpokladem je že se konstrukce nebude deformovat ve směru osy z . Nenulové složky poměrných přetvoření se tedy nacházejí pouze v rovině xy . [Brožovský, 2015]

$$\varepsilon = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}\}^T \quad (2.24)$$

Jelikož je uvažováno s nulovými přetvořeními v ose z , musí být uvažováno s nenulovým napětím ve směru osy z . Vektor napětí tedy bude mít čtyři složky. [Brožovský, 2015]

$$\sigma = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}\} \quad (2.25)$$

2.2.1 Vztahy pro rovinný problém

Vesměs se neliší od klasických vztahů popsaných výše, rozdíl je pouze v tom, že nenulovými jsou pouze ty veličiny, které působí v rovině xy .

Podmínky rovnováhy v rovině

Při rovinném problému, jak již bylo výše zmíněno, je možné popsat nanejvýš 2 nezávislé silové podmínky rovnováhy. Pro rovinu xy to budou podmínky.

$$\begin{aligned} \sum F_{x,i} &= 0 \\ \sum F_{y,i} &= 0 \end{aligned} \quad (2.26)$$

Po dosazení vztahů pro diferenciální objem (2.6) získáme tyto diferenciální rovnice.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + X &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + Y &= 0 \end{aligned} \quad (2.27)$$

X – Objemové zatížení v ose X

Y – Objemové zatížení v ose Y

Geometricko-deformační vztahy v rovině

Získání těchto vztahů probíhá opět z prostorových rovnic. V těchto rovnicích ponecháme pouze posunutí u a v , jelikož jsou v rovině xy nenulová. Takto se dají získat vztahy pro poměrná přetvoření ϵ_x , ϵ_y a pro zkosení. [Brožovský, 2015]

$$\begin{aligned}\epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}, \\ \epsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y}, \\ \gamma_{xy} = \gamma_{yx} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\end{aligned}\tag{2.28}$$

Pro posunutí w , obecně nenulové v úloze rovinné napjatosti, můžeme použít původní geometricko-deformační vztahy.

Fyzikální vztahy v rovině pro rovinnou deformaci

Stejně jako pro výše uvedené vztahy, přichází i zde zjednodušení oproti obecným vztahům popsaným výše. Nenulová napětí jsou σ_x , σ_y , σ_z a τ_{xy} plus 3 složky vektoru poměrného přetvoření ϵ_x , ϵ_y , γ_{xy} . [Brožovský, 2015]

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[(1-\nu)\epsilon_x + \nu\epsilon_y \right] \\ \sigma_y &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[\nu\epsilon_x + (1-\nu)\epsilon_y \right] \\ \tau_{xy} &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \gamma_{xy} \frac{1}{2}(1-\nu)\end{aligned}\tag{2.29}$$

Napětí σ_z je nenulové a má tvar

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)\tag{2.30}$$

Pomocí výše uvedených vztahů, přesuneme teorii napjatosti do rovinného problému. Obecně platí, že pokud v některém směru nemůže nastat posunutí, musí zde být napětí.

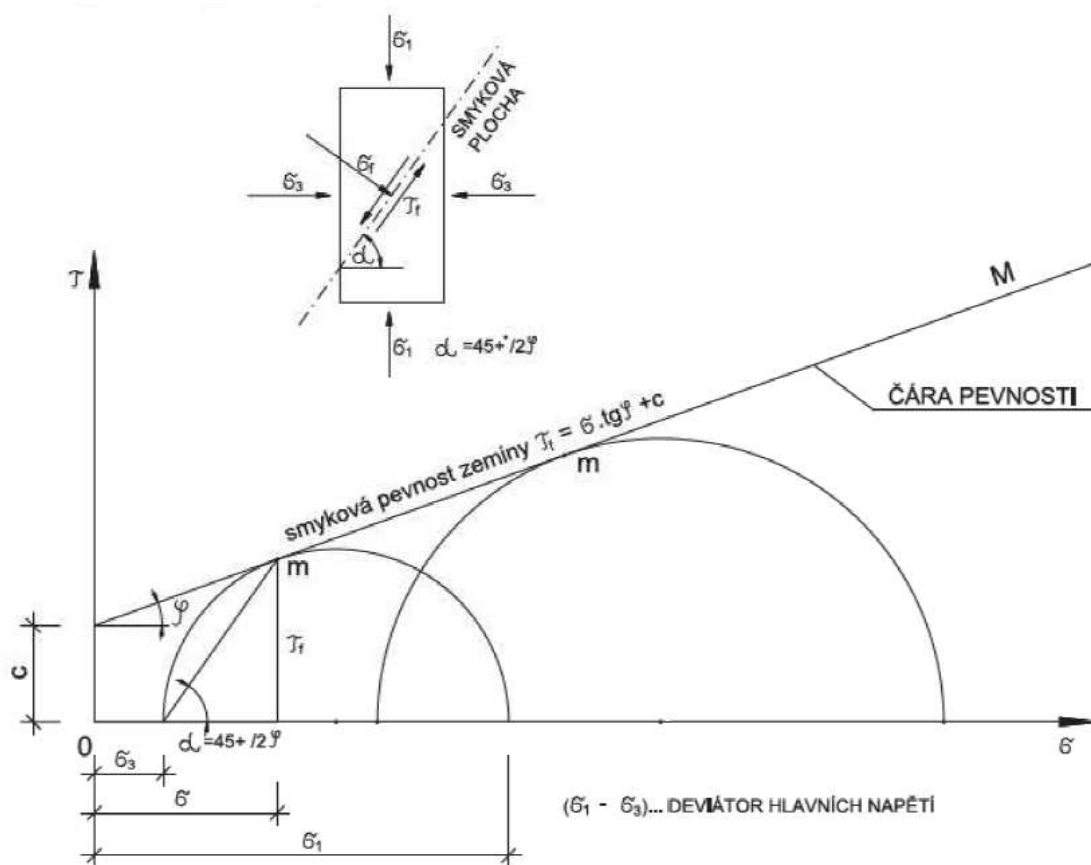
2.3 PEVNOST ZEMIN

2.3.1 Pevnost

Namáhaná zemina, se nejčastěji poruší ve smyku. Odpor zeminy ve smyku proto představuje hlavní zdroj její pevnosti. Znalost parametrů této pevnosti nám umožňuje řešit únosnosti zemin, stabilitu svahů a různé zemní tlaky.

Mohr – Coulombova teorie pevnosti

Ke znázornění napjatosti zemin se využívá hlavně Mohrova zobrazení. Mohrova teorie předpokládá, že k porušení (neboli překročení smykové pevnosti) dojde usmyknutím podle smykové plochy.



2.5 Mohr-Coulombovo zobrazení [Weiglová, 2005]

Pevnost zemin ve smyku (τ) je vyjádřena Coulombovým vztahem:

$$\tau_f = \sigma_f \tan \varphi + c \quad (2.31)$$

τ_f – Tangenciální napětí na smykové ploše (vnitřní odpor zeminy)

σ_f – Normálové napětí působící kolmo na smykovou plochu porušení

c – Soudržnost (koheze) zeminy

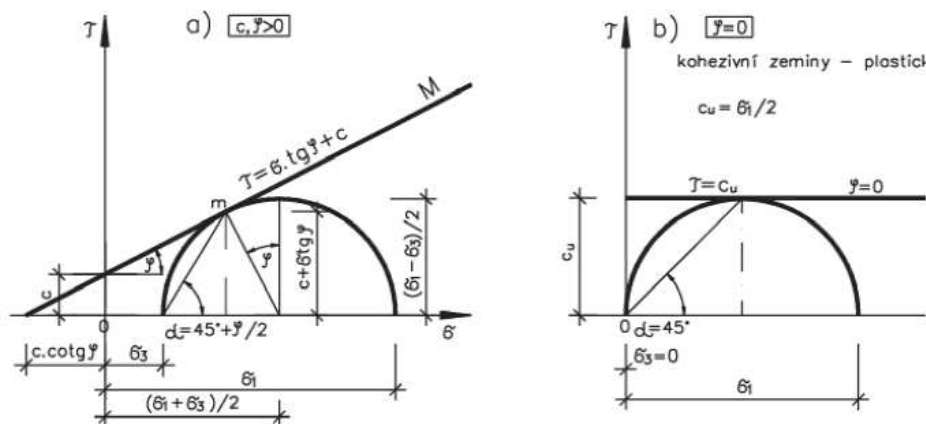
φ – Úhel vnitřního tření

Jedná se lineární rovnici a jejím grafickým znázorněním je přímka, tzv. čára pevnosti. Z tohoto znázornění vyplývá, že pro určitou hodnotu σ vždy získáme určitou hodnotu τ_f . Dle této definice dojde k porušení zeminy v případě, když smykové napětí τ dosáhne hodnoty smykové pevnosti τ_f .

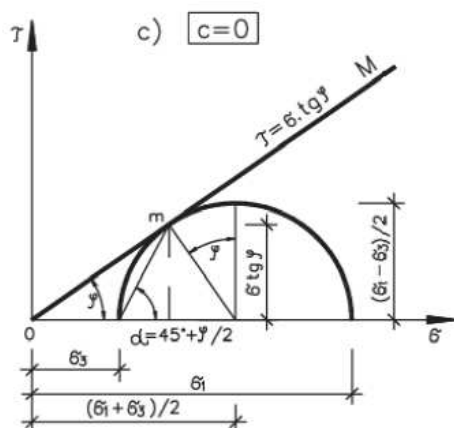
Při situaci, že smykové napětí dosáhne hodnoty smykové pevnosti, se Mohrova kružnice dotýká Coulombovy přímky v jednom bodě. Coulombova přímka, je tedy obalovou čarou

Mohrových kružnic. Pokud se kružnice dotýkají obalové čáry v bodě m , je dosaženo mezního stavu napětí a nastává mezní rovnováha. Mezní rovnováha znamená, že stav napjatosti je na mezi porušení. Nikdy tedy nemůže nastat situace, že smykové napětí je větší než smyková pevnost ($\tau > \tau_f$), jelikož už při $\tau = \tau_f$ je zemina porušena smykem.

SOUDRŽNÉ ZEMINY



NESOURŽNÉ ZEMINY



COULOMBOVA ROVNICE

- a) $\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + c$
- b) $\tau = c_u$
- c) $\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi$

NESOURŽNÉ ZEMINY

$$\sin \varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 \cdot \operatorname{tg}^2(45 + \varphi/2)$$

$$\sigma_3 = \sigma_1 \cdot \operatorname{tg}^2(45 - \varphi/2)$$

SOUDRŽNÉ ZEMINY

$$\sin \varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2 \cdot c \cdot \operatorname{ctg} \varphi}$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 \cdot \operatorname{tg}^2(45 + \varphi/2) + 2 \cdot c \cdot \operatorname{tg}(45 + \varphi/2)$$

$$\sigma_3 = \sigma_1 \cdot \operatorname{tg}^2(45 - \varphi/2) + 2 \cdot c \cdot \operatorname{tg}(45 - \varphi/2)$$

2.6 Coulombova přímka pro různé typy zemin [Weiglová, 2005]

Z obrázku Coulombových křivek vyplývá, že pevnost zeminy závisí především na parametrech smykové pevnosti zemin. Těmito parametry jsou soudržnost (c) a úhel vnitřního tření (φ).

Z obrázku se dají dále vyčíst rozdíly mezi soudržnými zeminami $c > 0$ a nesoudržnými zeminami kdy $c = 0$.

U soudržných zemin je tedy zdrojem smykového napětí tření mezi zrny skeletu reprezentované úhlem vnitřního tření (φ) a soudržností (c).

Na rozdíl od soudržných zemin, je u nesoudržných zemin nositelem a zdrojem smykové pevnosti pouze tření mezi zrny skeletu (φ). Soudržnost (c) u těchto zemin naprosto chybí. Pouze u písku v některých případech můžeme mluvit o tzv. nepravé soudržnosti a to když je písek vlhký. Tato soudržnost je daná kapilárními silami. Po vysušení tato tzv. nepravá soudržnost opět vymizí.

2.3.2 Efektivní napětí

Napětí v zeminách je velmi složité sledovat, obzvláště když je v zemině obsažena voda. Voda totiž nepřenáší smykovou pevnost. Musíme proto sledovat napětí v zrnech zeminy odděleně od napětí ve vodě.

Princip efektivních napětí poprvé formuloval rakousko – americký stavební inženýr a geolog, zakladatel půdní mechaniky Karl von Terzaghi. Na tomto principu spočívá základ mechaniky zemin. Terzaghi zavedl pojem efektivního napětí σ_{ef} , které je funkcí totálního napětí a napětí v pórech zeminy. Na tomto napětí závisí mechanické účinky změny napětí. Tyto změny jsou především změna objemu, neboli stlačitelnost a změna smykové pevnosti [Weiglová, 2005]

Vztah platící pro plně nasycené zeminy, jejichž póry jsou plně vyplněny vodou pod tlakem u , je definován níže.

$$\sigma = \sigma_{ef} + u \quad (2.32)$$

σ_{ef} – Napětí přenášené zrny

u – Napětí neutrální (tlak vody v pórech zeminy)

Když je voda v pórech v klidu, je napětí pouze hydrostatickým tlakem, který působí v každém bodě všemi směry. Tento předpoklad platí pouze pro normálová napětí, jelikož voda není schopna přenášet napětí smyková. Totální napětí tedy zahrnují i vliv neznámých neutrálních napětí u .

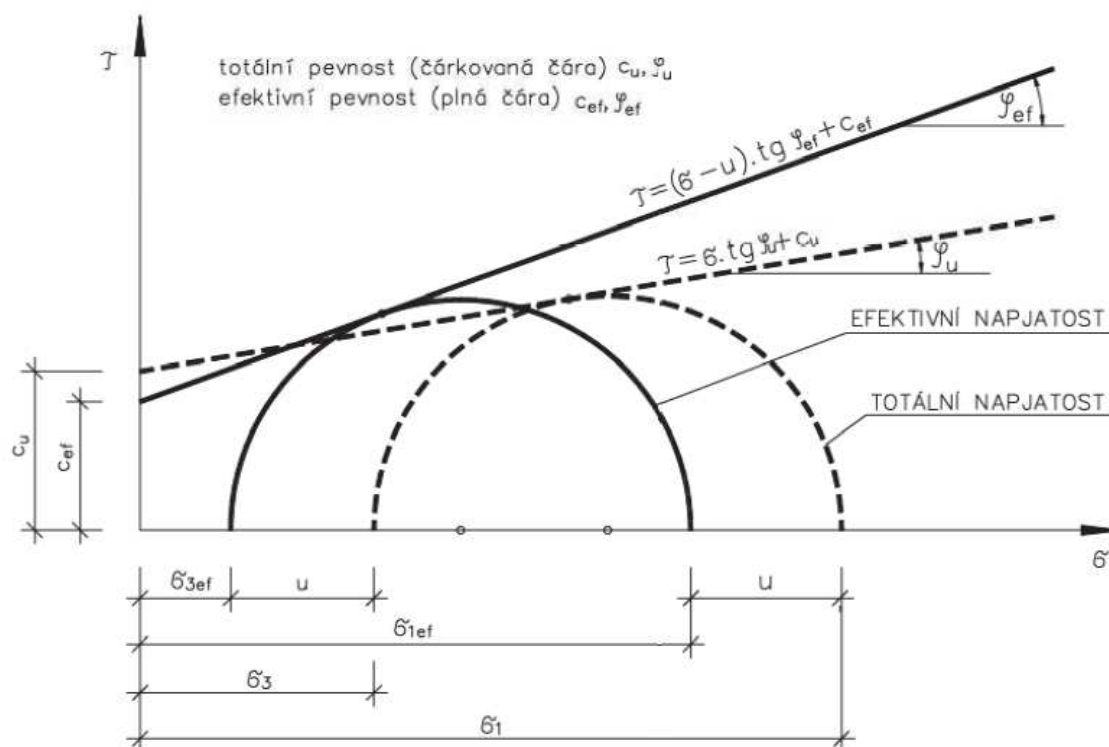
- Totální napětí

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_{1ef} + u \\ \sigma_3 &= \sigma_{3ef} + u \end{aligned} \quad (2.33)$$

- Efektivní napětí

$$\begin{aligned} \sigma_{1ef} &= \sigma_1 - u \\ \sigma_{3ef} &= \sigma_3 - u \end{aligned} \quad (2.34)$$

Mohrovy kružnice vynesené v totálních i efektivních parametrech mají tedy stejnou velikost, jsou pouze posunuté o hodnotu neutrálního napětí jako na obrázku níže.



2.7 Mohrovy kružnice totálního a efektivního napětí [Weiglová, 2005]

Pro výpočet totálních a efektivních napětí však potřebujeme znát pórové tlaky u .

2.3.1 Tlak vody v pórech zeminy a jeho stanovení

Výpočet tlaku vody v pórech vychází z definice piezometrických výšek pro jednotlivé body.

$$h = h_t + z \quad (2.35)$$

h – Piezometrická výška

h_t – Tlaková výška

z – Geodetická výška (vzdálenost bodu od srovnávací roviny)

Z tlakové výšky později můžeme vypočítat neutrální napětí neboli tlak vody v pórech.

$$h_t = \frac{u}{\rho g} \quad (2.36)$$

h_t – Tlaková výška

u – Tlak vody v pórech zeminy (neutrální napětí)

ρ – Hustota vody

g – Gravitační zrychlení

Tento tlak je nezávislou proměnnou a jeho velikost nemá vztah k celkovému napětí. Při změnách stavu napjatosti se v zemních tělesech změny smykové napětí okamžitě, ale efektivní

napětí jen postupně a to souběžně se změnami neutrálního napětí. Více se o výpočtech těchto tlaků můžeme dočíst například v práci [Bear, 1987].

Velikost těchto tlaků je velice důležitá zejména u zemních hrází, kde se tyto tlaky v důsledku zvýšeného napětí (tíha zeminy, zatížení vodou při napuštění nádrži, nebo pokles hladiny vody v nádrži) mohou měnit a velice ovlivnit stabilitu a tedy i bezpečnost celé hráze.

V těchto případech je nutné rozdělovat mezi nasycenou a ne zcela nasycenou zeminou. Je totiž rozdíl když póry vyplňuje pouze voda a když jsou plněné částečně vodou a částečně vzduchem. V případě této práce je počítáno pouze s tím, že jsou póry absolutně vyplněny vodou.

$$\sigma_{lef} = \sigma_1 - u_a \quad (2.37)$$

u_a – Tlak vody v pórech

σ_1 – Totální napětí

Pro tlak vody v pórech existují dvě varianty a to varianta kdy je tlak větší než nula a varianta kdy je tlak menší než nula. Tato práce posuzuje proudění vody hrází, tedy tlak větší než 0 bude pod hladinou vody. Naproti tomu tlak nižší než 0 bude nad hladinou. Tomuto tlaku se říká takzvaný sací tlak. Tento tlak, přisává částčky zeminy k sobě a tím nepříznivě ovlivňuje stupeň bezpečnosti. Při výpočtu pomocí tohoto tlaku se tedy stupeň bezpečnosti zvyšuje. Jelikož nemůžeme říct, že v hrázi bude sací tlak vždy přítomen (například během deště), bylo rozhodnuto vypočítat stupně bezpečnosti bez tohoto sacího tlaku a posunout tak výpočet na stranu bezpečnosti.

V této práci se tedy výpočty pomocí sacího tlaku provádí pouze při výpočtech proudění vody hrází, jelikož poskytují lepší výsledky ohledně hladiny vody v hrázi zejména při poklesu.

2.4 METODY VÝPOČTU STUPNĚ BEZPEČNOSTI

Základ těchto metod je nalezení smykové plochy a stupně bezpečnosti pro daný svah.

2.4.1 Metody mezní rovnováhy

Cílem těchto metod je najít stupeň bezpečnosti na předem určené smykové ploše. Metody vychází ze stavu na mezi porušení, skutečný stav je s tímto stavem později srovnán. Pro výpočty soudržných zemín, které vytváří, válcovou smykovou plochu se nejlépe hodí Felleniova (Petterssonova) metoda a Bishopova metoda. U nehomogenních svahů, obsahujících nesoudržné zeminy jsou charakteristické složené smykové plochy obecného tvaru [Říha, 2008].

Felleniova metoda (Petterssonova metoda)

Jedná se o nejjednodušší metodu výpočtu stupně bezpečnosti. Platí zde pouze jedna podmínka rovnováhy (Momentová) a je zde pouze jedna neznámá (Stupeň bezpečnosti). Metoda spočívá ve volbě smykové plochy. Na této ploše jsou poté vyznačeny elementy (proužky). Počítá se pouze se silami, které vytváří proužky vlastní tíhou, všechny ostatní síly jsou zanedbávány. Tyto síly jsou poté rozděleny na aktivní a pasivní síly. Jejich podíl dává výsledný stupeň bezpečnosti. Pasivní síly mají tendenci držet svah pohromadě, kdežto aktivní síly mají tendenci svah usmyknout.

$$SF = \frac{\sum F_{pasivní}}{\sum F_{aktivní}} \quad (2.38)$$

SF – Stupeň bezpečnosti (Safety factor)

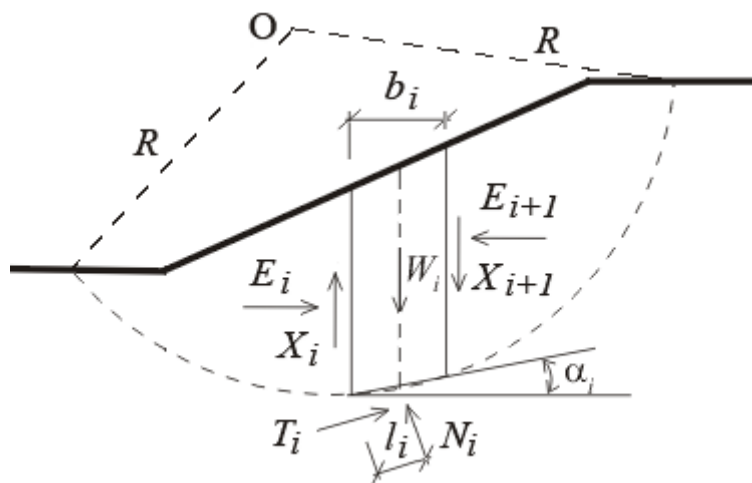
$F_{pasivní}$ – Pasivní síly

$F_{aktivní}$ – Aktivní síly

Když je výsledek tohoto výpočtu větší než 1, svah je stabilní. Tato metoda je poměrně jednoduchá a rozšiřená.

Bishopova metoda

Tato metoda je o něco složitější než Felleniova. Stejně jako Felleniova metoda zavádí momentovou podmínku rovnováhy, ale přidává i podmínku rovnováhy sil na proužku. Neznámou je opět stupeň bezpečnosti. Tato metoda předpokládá nulové smykové síly mezi proužky.



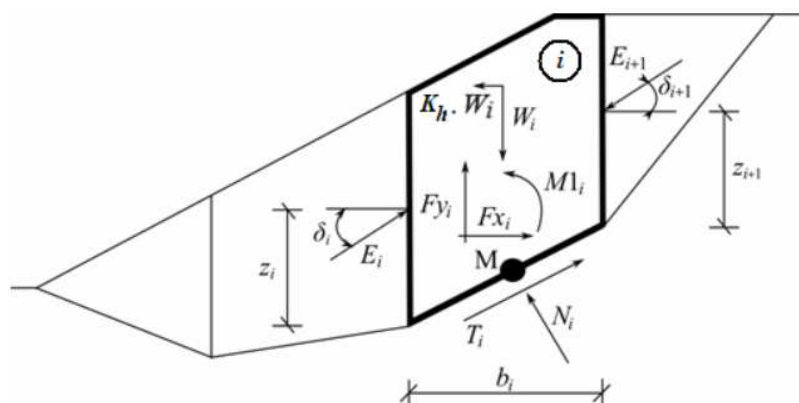
2.8 Výpočetní schéma Bishopovy metody [Online nápověda, www.fine.cz]

Morgenstern-Price

Metoda počítá s nenulovými silami mezi bloky. Výslednice normálových a smykových sil mají rozdílné sklony na každém bloku. Tato metoda splňuje všechny podmínky rovnováhy. Výpočet stupně bezpečnosti SF probíhá pomocí dvojnásobného iteračního postupu. Iterují se zde sklony meziblokových sil a stupeň stability.

Spencerova metoda

Je téměř totožná s metodou Morgenstern-Price. Meziblokové síly jsou taktéž nenulové. Rozdílem oproti metodě Morgenstern-Price je ten, že výslednice normálových a smykových sil mají konstantní sklon.



2.9 Výpočetní schéma Spencerovy metody [Online nápověda, www.fine.cz]

Metoda Janbu

Jedna z metod, u kterých se stanovuje stupeň stability na obecné smykové ploše. Prostor nad smykovou plochou je dělen dělicími plochami na jednotlivé bloky. Metoda se zakládá na splnění rovnováhy sil a momentů v jednotlivých blocích. Jediná podmínka, která není splněna, je podmínka na horním bloku.

Stupeň stability je spočítán pomocí iterace meziblokových sil. Špatně zvolená poloha meziblokových sil znamená, že nebude splněna podmínka rovnováhy.

Výpočet pomocí MKP

Metoda mezní rovnováhy se dá vypočítat i pomocí metody konečných prvků. Rozdělením oblasti na konečné množství prvků a výpočtem získáme napětí na smykové ploše. Z tohoto napětí později můžeme vypočítat normálové a smykové síly na smykové ploše, ze kterých vyjádříme výsledný stupeň bezpečnosti.

Metoda	Silová podmínka	Momentová podmínka	Tvar smykové plochy
Fellenius	Ne	Ano	Kruhový
Bishop (zjednodušený)	Ne	Ano	Kruhový
Morgenstern-Price	Ano	Ano	Libovolný
Spencer	Ano	Ano	Libovolný
Janbu	Ano	Ne	Libovolný
MKP	Ano	Ano	Libovolný

2.1 Srovnání metod mezní rovnováhy

2.4.2 Metoda redukce parametrů smykové pevnosti

Metoda redukce smykových parametrů (Shear strength reduction method – SSRM). Základní princip této metody byl formulován J. M. Duncanem v roce 1996. Metoda vychází z definice stupně bezpečnosti (Shear Strength Reduction Factor SSRF).

$$SF = \frac{c_{p\u0305\u0305v}}{c_{red}} \quad (2.39)$$

SF – Stupeň bezpečnosti

$c_{p\u0305\u0305v}$ – Původní soudržnost

c_{red} – Redukovaná soudržnost

$$SF = \frac{\operatorname{tg} \varphi_{p\u0305\u0305v}}{\operatorname{tg} \varphi_{red}} \quad (2.40)$$

SF – Stupeň bezpečnosti

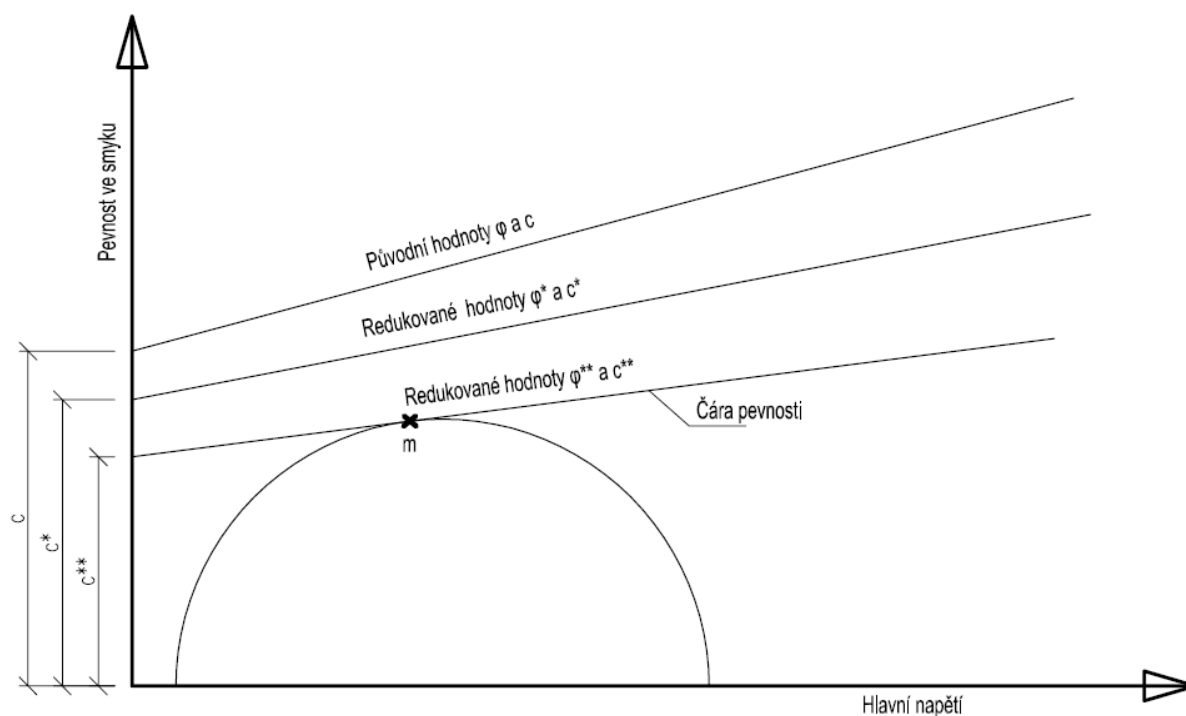
$\varphi_{p\u0305\u0305v}$ – Původní úhel vnitřního tření

φ_{red} – Redukovaný úhel vnitřního tření

Tato metoda vychází z Mohr – Coulombovy podmínky pevnosti a porušení popsané výše.

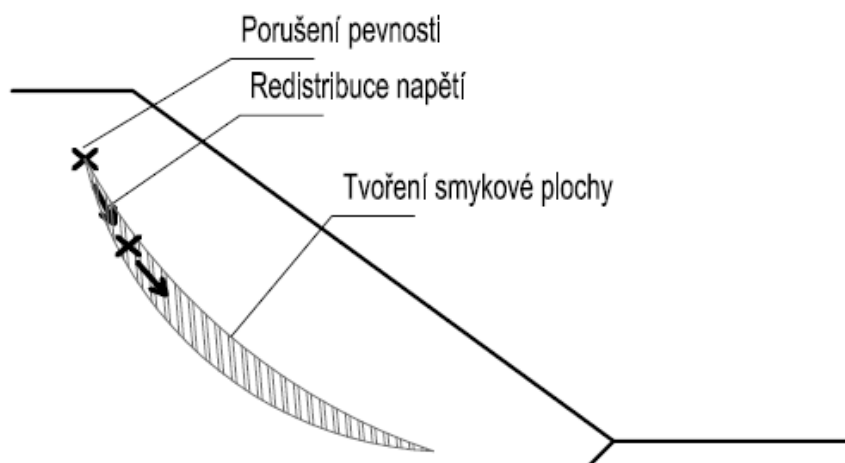
$$\tau_f = \sigma \operatorname{tg} \varphi + c \quad (2.41)$$

Zprvu je čára pevnosti tvořena skutečnými hodnotami c a φ , ale jak se zvyšuje stupeň bezpečnosti, jsou hodnoty redukovány určitým redukčním krokem, například pokaždé o 0,1. Čára pevnosti se postupně blíží k Mohrovým kružnicím, kde dosáhne na skutečnou smykovou pevnost zeminy. Vše je vidět na následujícím obrázku, bod m je bod dosažení smykové pevnosti. Stupeň bezpečnosti zeminy je roven nejvyšší hodnotě SF (Safety factoru), pro kterou ještě byl zachován rovnovážný stav.



2.10 Redukce parametrů smykové pevnosti

Jakmile je tato skutečná pevnost zeminy dosažena, je porušena pevnost v konkrétním elementu. Napětí se redistribuuje do ostatních elementů a celý proces redukce začíná znovu.



2.11 Redistribuce napětí a tvorba smykové plochy

Takto je vytvořena smyková plocha, tj. z elementů které ztratily svou smykovou pevnost. Jakmile smyková plocha dorazí na okraj vyšetřované oblasti, napětí se už nemá kde redistribuovat a výpočet končí. Výsledný stupeň bezpečnosti je posléze počítán jako průměr ze všech dosažených stupňů bezpečnosti na smykové ploše.

2.5 PROGRAM PLAXIS 2D

„Plane strain and Axisymetry“. Program je využíván k výpočtu geotechnických konstrukcí pomocí deformační metody konečných prvků. Použití v praxi se točí kolem stabilitních výpočtů podzemních konstrukcí a stavebních jam.

2.5.1 Historie:

Vývoj tohoto programu započal v polovině 80. let minulého století. Začátek projektu je datován někdy do roku 1974. Výsledkem tohoto projektu byl program na bázi metody konečných prvků, který se jmenoval ELPLAST. Program ELPLAST umožňoval rovinně-deformační výpočty soudržnosti v elastoplastické rovině. Využíval šestiuzlové trojúhelníkové konečné prvky. Roku 1981 dostal program nadstavbu s možností výpočtu rotačně symetrických i asymetrických úloh. Téhož roku byla taktéž provedena změna názvu na PLAXIS. pozdější pokrok v simulacích penetračních zkoušek a dalších asymetrických úloh vyžadoval vývoj nových konečných prvků. Proto byly vyvinuty patnácti prvkové trojúhelníkové izoparametrické konečné prvky. Roku 1985 byl spuštěn nový cíl programu a to přinést tento software do standartních stolních počítačů. Splnit cíle se skutečně o dva roky později podařilo a program byl vydán. Od roku 1987 již bylo vydáno 6 verzí tohoto programu [Chalmovský, 2014].

2.5.1 Moduly programu

Plaxis 2D:

Modul zaměřený na 2D analýzu napěťo-deformačního a stabilitního stavu geotechnických konstrukcí (existují specializované moduly pro dynamickou analýzu Dynamic a analýzu hydrogeologickou PlaxFlow) [Chalmovský, 2014].

3D Tunnel:

Tento modul byl vyvinut speciálně pro 3D analýzu tunelů, s jistou dávkou omezení, je ale možné tento modul využít i pro další prostorové geotechnické úlohy. Nejedná se ale o plnohodnotný 3D software (zde je pouze řez protahován do délky) [Chalmovský, 2014].

Plaxis 3D Foundation:

Tento modul se především specializuje na analýzu základových konstrukcí. Taktéž se nejedná o plnohodnotný 3D software. (Zde je řez protahován do hloubky) [Chalmovský, 2014].

Plaxis 3D:

Zaměřuje se na kompletní 3D analýzu geotechnických konstrukcí (tunelů, svahů, stavebních jam apod.). Zde již se jedná o plnohodnotný 3D software [Chalmovský, 2014].

2.5.2 Popis programu

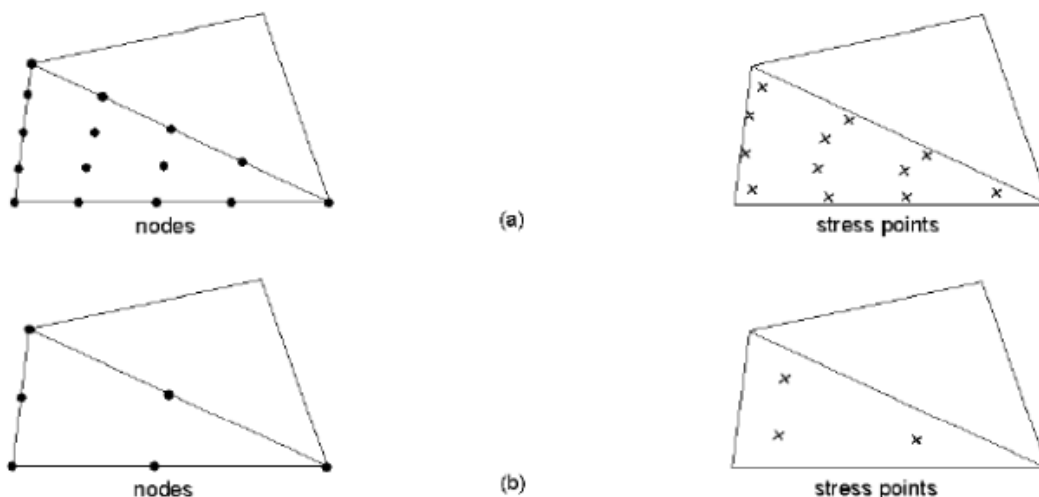
Jak už bylo zmíněno, program Plaxis pracuje na základě deformační metody konečných prvků. Geometrický model je v programu složen z bodů, linií a clusterů.

Linie – Pomocí těchto definujeme fyzické hranice geometrie modelu.

Custery – Toto jsou oblasti pevně ohraničené liniemi a uvnitř těchto clusterů jsou homogenní materiálové vlastnosti.

Z geometrického modelu je poté vytvořena síť konečných prvků. Tato síť je založena na uspořádání jednotlivých bodů, linií a clusterů. Prvky sítě obsahují body napětí tzv. stress points. Při automatickém generování sítě jsou clustery rozděleny do trojúhelníkových prvků.

Podle počáteční nabídky při startu programu Plaxis, se pro výpočet dají zvolit šesti, nebo patnácti uzlové prvky. Posuny jsou posléze počítány na uzlech, k vyčíslení napětí slouží poté tzv. stress points do češtiny volně přeloženo jako napěťové body. Vše si můžeme prohlédnout v následujícím obrázku 2.12. Na obrázku (a) jsou znázorněné patnácti uzlové prvky sítě, spolu s vytvořenými stress pointy. Na obrázku (b) vidíme šesti uzlové prvky sítě, s vytvořenými stress pointy [Chalmovský, 2014].



2.12 Patnácti a šesti uzlové body společně s vytvořenými stress pointy [Chalmovský, 2014]

Modelování v programu Plaxis 2D

Jelikož jsou průběhy zatěžování jednotlivých zemin nelineární, je nutné tuto nelinearitu popsat modely chování jednotlivých zemin. Existuje celá řada modelů, od jednoduchých po složité modely, které jsou náročnější na výpočet, ale lépe popisují chování jednotlivých zemin. Obecně platí, že čím větší počet parametrů dané zeminy se do modelu zadává, tím je model složitější. V této kapitole popíšu některé z 10 modelů, které je možno v programu Plaxis použít. Nejvíce bych popsal Mohr-Coulombův model, který je použit při výpočtech v mé diplomové práci.

- Lineárně elastický model

Tento konstituční model je založen na Hookově zákoně. Pro modelování zemin se spíše nehodí, jelikož zemina se při zatěžování nechová pružně, ale pružně-plasticky. Používá se především při modelování tuhých konstrukcí (např. z betonu). Vstupní parametry jsou objemová hmotnost materiálu, modul pružnosti a Poissonovo číslo [Chalmovský, 2014].

- Hardening soil model

Jedná se o pokročilejší často využívaný elasto–plastický konstitutivní model. Jedná se o model s dvojitým objemovým a smykovým zpevněním. U tohoto modelu se jedná především o to, že se zemina chová jinak během prvotního zatížení a pozdějšího znovu přitížení. Tuhost zeminy je závislá na napětí a v oblasti malých přetvoření se zvyšuje.

Jako kritérium porušení je opět použita Mohr–Coulombova podmínka porušení definovaná pevnostními parametry. Při dosažení deviátoru napětí je splněna Mohr–Coulombova podmínka porušení.

Vstupními materiály jsou: úhel vnitřního tření φ , soudržnost c , referenční sečnový modul E_{50}^{ref} , referenční edometrický modul E_{oed}^{ref} , referenční modul pružnosti při namáhání a opětovném přitížení E_{ur}^{ref} , Poissonovo číslo při odtížení a opětovném přitížení ν_{ur} , exponent řídící závislost deformačních parametrů na napětí σ_1 a σ_3 , referenční napětí na které se vztahují referenční hodnoty tuhosti p_{ref} , koeficient

zemního tlaku v klidu K^{nc}_o pro podmínky normální konsolidace, R_f poměr q_f/q_a [Chalmovský, 2014].

- Hardening soil model with small strain stiffness (HSS)

Jedná se o původní formulaci HS modelu pouze doplněnou o možnost zvýšení tuhosti zeminy v oboru malých přetvoření. V tomto oboru je tuhost zeminy výrazně vyšší, následována nelineárním poklesem s rostoucím přetvořením. Oproti původnímu HS modelu jsou navíc doplněny dva dodatečné parametry. Tyto parametry jsou:

Počáteční smykový modul – modul při velmi malých přetvořeních ($\varepsilon < 10e^{-6}$) G_G^{ref} . Platí pro něj závislost na napětí.

Hodnota smykového přetvoření $\gamma_{0,7}$ při kterém klesne počáteční smykový modul G_0 na 72% původní hodnoty.

Tyto modely mohou mít zásadní vliv na analýzu pažících konstrukcí [Chalmovský, 2014].

- Soft soil model (SS)

Je konstituční model používaný pro normálně konsolidované soudržné zeminy s vysokou mírou stlačitelnosti. Jako kritérium porušení je aplikována Mohr-Coulombova podmínka porušení. V modelu je zahrnuta lineární závislost tuhosti na napětí, odlišná tuhost při prvotním zatížení, následném odtížení a následném přetížení. Tento model vyžaduje 8 vstupních parametrů [Chalmovský, 2014].

- Jointed rock model

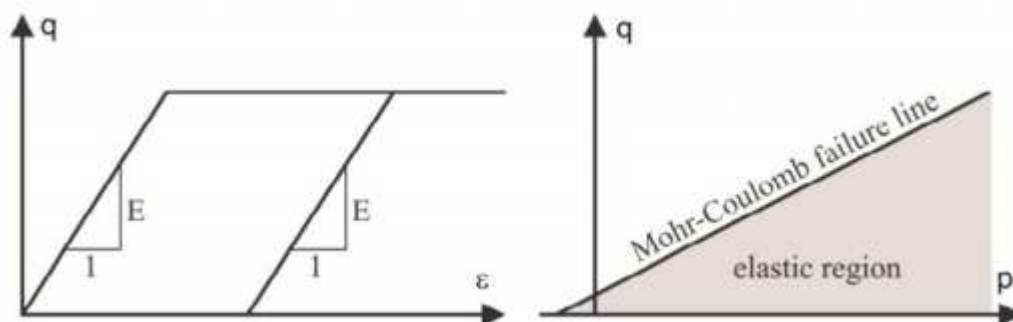
Využitelný především při simulaci chování skalních hornin. Rozlišuje se zde elastická a plastická anizotropie. Elastická anizotropie se projevuje rozdílnou tuhostí materiálu v různých směrech. Pro tento model je nutné definovat 5 nezávislých deformačních veličin [Chalmovský, 2014].

- Mohr-Coulomb model

Jedná se o lineárně elastický, perfektně plastický konstituční model. Vyžaduje 5 vstupních parametrů:

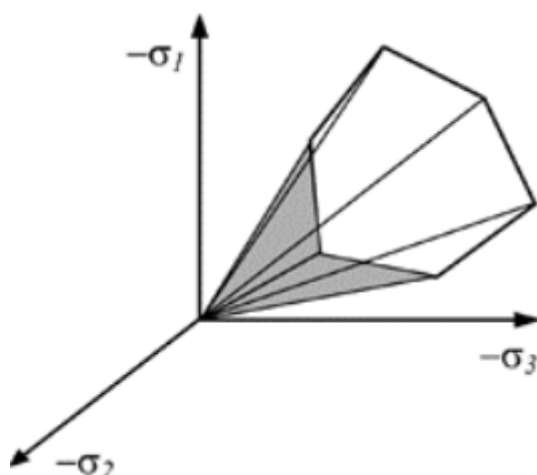
Modul pružnosti E_{ref} , Poissonovo číslo ν , Kohezi c , Úhel vnitřního tření φ , úhel dilatance ψ .

Tyto parametry můžeme získat z běžných zkoušek mechaniky zemin.



2.13 Charakteristika Mohr-Coulombova modelu [Chalmovský, 2014]

Toto přímky znázorňují průmět Mohr-Coulombovy plochy plasticity do roviny.



2.14 Prostorové zobrazení Mohr-Coulombovy křivky v prostoru hlavních napětí [Mašín]

Jak už bylo zmíněno o několik kapitol výše v teoretické přípravě, velmi důležitou vlastností zemin je obsah vody v pórech. K namodelování těchto vztahů voda – zemina umožňuje program Plaxis 2D stanovit chování za odvodněných a neodvodněných podmínek.

Odvodněné chování (DRAINED)

Při tomto chování nevznikají v zemině žádné pórové tlaky. Voda při stlačení pouze odteče jinam. Toto chování je vhodné přisoudit zeminám s velkou propustností jako je například písek nebo štěrk.

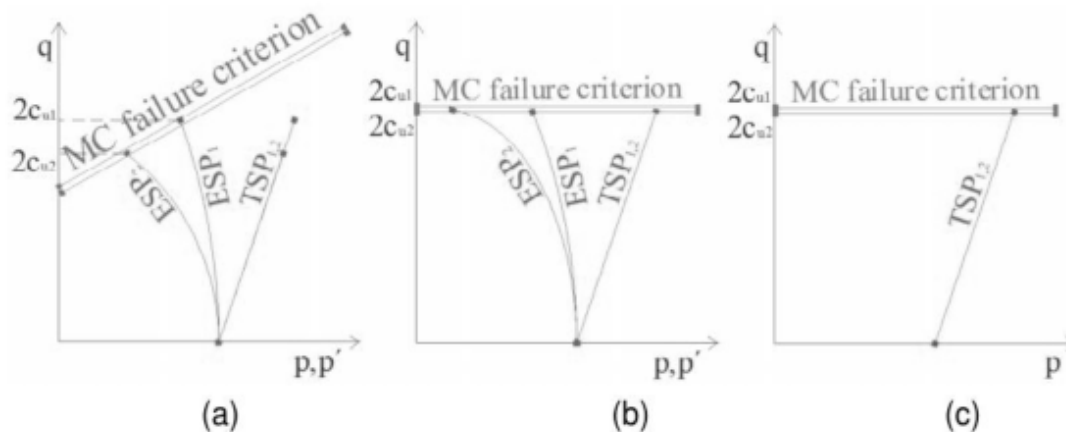
Neodvodněné chování (UNDRAINED)

Undrained A – Využité jsou efektivní parametry tuhosti a pevnosti. Efektivní parametry tuhosti jsou doplněny o objemový modul vody K_v , rozlišeny jsou efektivní a totální dráhy napětí. Neodvodněná smyková pevnost není vstup ale výstup výpočtu. Vývoj pórových je dominantní pro určení průběhu dráhy efektivních napětí [Chalmovský, 2014].

Undrained B – Využity jsou totální parametry pevnosti a efektivní parametry tuhosti. Jako vstupní parametr je vyžadována neodvodnělá smyková pevnost S_u . Pro sestavení matice tuhosti program opět při efektivních parametrech tuhosti využívá objemový modul vody K_w . Posléze dojde k výpočtu pórových tlaků a rozlišením mezi totální a efektivní dráhou napětí. Neodvodnělá smyková pevnost již není vstupní hodnotou a nedochází k jejímu ovlivňování průběhem efektivní dráhy napětí [Chalmovský, 2014].

Undrained C – Využívají se jak totální parametry tuhosti, tak pevnosti. Na rozdíl od předchozích dvou případů není rozlišováno mezi tuhostí skeletu a vody v pórech. Jako postup se vyžaduje také totální Youngův modul pružnosti E_{oed} . Nedochází tedy k výpočtu pórových tlaků a rozlišování mezi efektivními a totálními dráhami napětí. Tento typ chování materiálu je k dispozici pouze pro lineárně elastický, Mohr – Coulombův a NGI – ADP konstituční model [Chalmovský, 2014].

Schématické znázornění průběhů efektivních (ESP) a totálních drah napětí (TSP), při chování materiálu UNDRAINED A, B, C.



2.15 Schematické srovnání průběhu ESP a TSP pro typy chování materiálu [Chalmovský, 2014]

Ve své diplomové práci užívám odvozené chování (DRAINED) pro písky a dobře zrněné šterky, stejně tak jako pro materiál, který je obsažen v drénu. Pro ostatní zeminy s příměsí jílu je užito neodvodněného chování materiálu (UNDRAINED A).

2.5.3 Posloupnost kroků matematického modelování

Plaxis Input:

1. Vytvoření geometrie modelu
2. Zadání okrajových podmínek
3. Definování vstupních parametrů zemin a strukturních prvků
4. Vygenerování sítě konečných prvků a případné zahuštění (optimalizace)
5. Přiřazení vlastností jednotlivým částem modelu
6. Tvorba sítě

Plaxis Calculations:

7. Definování a úprava počátečních podmínek
8. Výpočet

Plaxis Output:

9. Analýza a export výsledků

3 POŽADAVKY NA STABILITU SVAHŮ ZEMNÍCH HRÁZÍ

3.1 VÝBĚR ZEMINY

Předpoklady pro stabilitu svahů malých vodních nádrží jsou dle ČSN 75 2410 definovány především správným materiálovým složením a správnými sklony svahů. Norma nám dále udává vlastnosti daných materiálů a to zda se materiál hodí do samostatné homogenní hráze, jádra nehomogenních hrází či jako přísyp nehomogenních hrází. Musíme však počítat s tím, že vlastnosti materiálů v normě obsažené jsou do normy vkládány s určitou bezpečnostní rezervou.

Jako velmi vhodné pro homogenní hráze se jeví zejména jílové a hlinité zeminy s příměsí různých hrubozrnných materiálů (štěrk, písek). Tyto materiály mají dobré vlastnosti, co se týká propustnosti, jelikož obsahují částičky jílových a hlinitých zemin. Nejsou sice tak skvělé jako u čistých jílů nebo hlín, ale zde větší propustnost vynahrazuje šířka hráze. Zároveň díky obsahu hrubých částic jsou vcelku soudržné a mají vyšší úhel vnitřního tření. Dovoluje nám to navrhovat strmější sklony svahů hrází a tím uspořit místo a materiál. Patří zde například štěrk hlinitý a štěrk jílový, tyto dva vykazují dle ČSN výborné vlastnosti pro homogenní hráze.

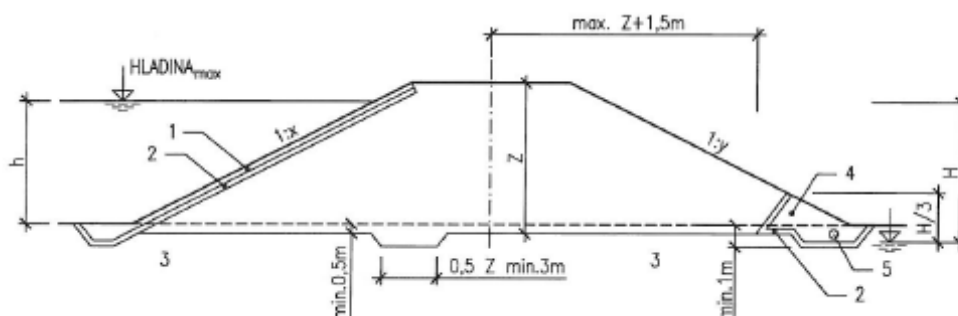
Naproti tomu při návrhu nehomogenní hráze se počítá s tím, že jíly a hlíny v těsnění hráze jsou téměř nepropustné (velmi malé hodnoty hydraulické vodivosti k), ale mají menší soudržnost a úhel vnitřního tření. Proto těsnění, které nemusí být ani moc široké, zatěžuje přísyp ze zrnitých materiálů, které mu dodávají především stabilitu. Zde se jako materiál těsnění výborně hodí písek hlinitý a písek jílovitý, společně s jílem s nízkou plasticitou. Pro stabilizační část se výborně hodí štěrk dobře zrněný a štěrk špatně zrněný.

Znak skupiny	Homogenní hráz	Těsnicí část	Stabilizační část
GW	nevhodná	Nevhodná	výborná
GP	nevhodná	Nevhodná	výborná
G-F	málo vhodná	Nevhodná	velmi vhodná
GM	výborná	velmi vhodná	málo vhodná
GC	výborná	velmi vhodná	málo vhodná
SW	nevhodná	Nevhodná	vhodná
SP	nevhodná	Nevhodná	vhodná
S-F	nevhodná	Nevhodná	vhodná
SM	vhodná	Vhodná	málo vhodná
SC	velmi vhodná	Výborná	nevhodná
MG	velmi vhodná	velmi vhodná	nevhodná
CG	velmi vhodná	Výborná	nevhodná
MS	vhodná	Výborná	nevhodná
CS	velmi vhodná	velmi vhodná	nevhodná
ML-MI	málo vhodná	Vhodná	nevhodná
CI-CI	vhodná	velmi vhodná	nevhodná
MH-ME	málo vhodná	málo vhodná	nevhodná
CH-CE	málo vhodná	málo vhodná	nevhodná

3.1 Vhodnost zemin pro různé zóny hrází dle ČSN 75 2410

3.2 GEOMETRIE HRÁZÍ

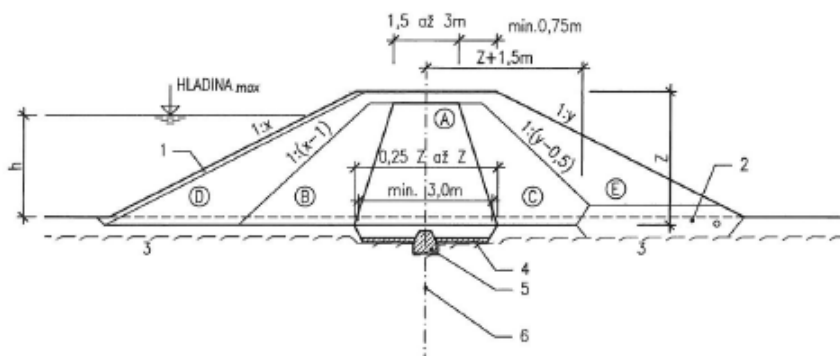
Důležitou úlohu při návrhu hráze vodních nádrží hraje geometrie, především sklony svahů hrází. Rozdíl je především u sklonů návodního a vzdušního svahu. Návodní svahy bývají většinou mírnějšího sklonu než vzdušní, jelikož musí snášet namáhání během poklesu vody v nádrži.



Legenda

- 1 Opevnění
- 2 Filtr
- 3 Nepropustné podloží
- 4 Patní drén
- 5 Drenážní potrubí

3.1 Vzorový řez homogenní hrází dle ČSN 75 2410 [ČSN 75 2410, 2011]



Legenda

- 1 Opevnění
- 2 Drenážní prvek
- 3 Skalní podloží
- 4 Betonová vyrovnávací vrstva
- 5 Betonová zavazující ostruha
- 6 Těsnící prvek v podloží

3.2 Vzorový řez nehomogenní hrází dle ČSN 75 2410 [ČSN 75 2410, 2011]

Varianty hráze	Zatřídění zemin		Sklony svahů	
	Těsnicí část	Stabilizační část	Návodní 1:x ⁴⁾	Vzdušní 1:y
Střední těsnění štíhlé	GM, GC, SM	lom. Kámen	1:1,75	1:1,5
	SC, CG, MG	GW, SW	1:2,8 ¹⁾	1:1,75
	ML-MI, CL-CI	GP, SP	1:3 ¹⁾	1:1,75
Střední těsnění šikmé	GM, SM	lomový kámen	1:3	1:1,5
	GC, SC, MG, CG, MS, CS	GW, SW	1:3,2	1:1,75
	ML-MI, CL-CI	GP, SP	1:3,4	1:1,75
Střední těsnění široké	GM, GC, SM, SC, MG, CG, MS, CS	lomový kámen, GW, GP	1:3, 1:3,2	1:1,2 ²⁾
	ML-MI, CL-CI	SW, SP	1:3,4	1:2,2 ³⁾
Homogenní hráz ⁵⁾	GM, SM		1:3	1:2
	GC, SC		1:3,4	1:2
	MG, CG, MS, CS		1:3,3	1:2
	ML-MI, CL-CI		1:3,7	1:2,2
1) U velmi propustného materiálu, popř. se zřetelem k rychlosti poklesu hladiny, je možné zvětšit až na 1:2,25.				
2) Je-li v podloží hráze materiál o smykové pevnosti min. $\phi_{ef}=37^\circ$ je možné zvětšit na 1:1,8.				
3) Je-li v podloží hráze materiál s min. $\phi_{ef}=37^\circ$ je možné zvětšit na 1:2,0.				
4) Uvedený sklon návodního svahu se použije pod nejvyšší dlouhodobě udržovanou hladinou. Nad ní lze použít sklon 1:(x-0,5).				
5) U hrází do výšky 4m se může sklon návodního svahu zvětšit na 1:(x-0,5).				

3.2 Orientační hodnoty sklonů svahů hrází MVN dle ČSN 75 2410

3.3 STUPNĚ BEZPEČNOSTI

Dle ČSN 75 2410 jsou minimální stupně bezpečnosti hrází formulovány takto:

A. Během výstavby

- Pro vypočtené pórové tlaky SF = 1,2
- Pro měřené pórové tlaky SF = 1,1

B. Po dokončení výstavby

- Nádrž prázdná
 - Pro vypočtené pórové tlaky SF = 1,5
 - Pro měřené pórové tlaky SF = 1,3
- Nádrž částečně naplněná SF = 1,5
- Nádrž plná SF = 1,5
- Náhlý pokles hladiny v nádrži
 - Z maximální na kritickou SF = 1,1
 - Podle manipulačního řádu SF = 1,5

C. Zemětřesení do 8° MSK 64 včetně SF = 1,0

V původní normě ČSN 73 6824 pro MVN se stupně bezpečnosti nevyskytovaly. Tato původní norma si vystačila pouze s doporučenými sklony svahů hrází. Při revizi normy a přechodu na novou normu ČSN 75 2410, byly stupně bezpečnosti doplněny. Bohužel jedná se o stupně bezpečnosti převzaté z normy pro velké sypané hráze. Tyto stupně bezpečnosti byly bohužel převzaty beze změn a vyvstává tedy otázka, zda by pro malé sypané hráze, které jsou většinou kategorie IV., měly platit stejné stupně bezpečnosti jako pro sypané hráze I. až III. kategorie.

4 POSTUP ŘEŠENÍ

4.1 GEOMETRIE HRÁZÍ

Většina hrází MVN je tvořena především homogenními materiály. Z tohoto důvodu bylo pro tuto práci vybráno více homogenních hrází než nehomogenních. Konkrétně 5 homogenních hrází a 3 nehomogenní. Z tohoto základního předpokladu vychází i geometrie těchto hrází.

Výpočtový model byl u všech hrází zvolen stejně a to na levé straně návodní svah s nádrží a na pravé straně vzdušný svah s patním drénem.

Výpočtová geometrie hrází vychází z normy ČSN 75 2410 a poté z doporučení pro sestavení výpočtového modelu programu Plaxis 2D. Každá hráz bude vysoká 9m s maximální hladinou vody 1m pod korunou hráze. Šířka koruny hráze byla zvolena 5m u každé z hrází. V každé hrázi bude obsažen patní drén s rozměry, které určuje norma ČSN 75 2410. Sklony návodních a vzdušných svahů jednotlivých hrází budou voleny podle doporučení z ČSN 75 2410.

Jednotlivé sklony návodních a vzdušných svahů hrází jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Návodní svah hrází bude vždy v mírnějším sklonu než vzdušný a proto bude vykazovat vyšší odolnost proti usmýknutí při prázdné a plné nádrži. Naproti tomu bude méně odolný během poklesu hladiny vody v nádrži, jelikož voda z něj při rychlém poklesu vysakuje a tím snižuje jeho smykovou pevnost.

	Materiál	Sklon	
		Vzdušný	Návodní
Homogenní hráze	GM - Štěrk hlinitý	1:2	1:3
	SM - Písek hlinitý	1:2	1:3
	GC - Štěrk jílový	1:2	1:3,4
	CS - Jíl písčité	1:2	1:3,3
	CI - CI Jíl s nízkou plasticitou	1:2,2	1:3,7

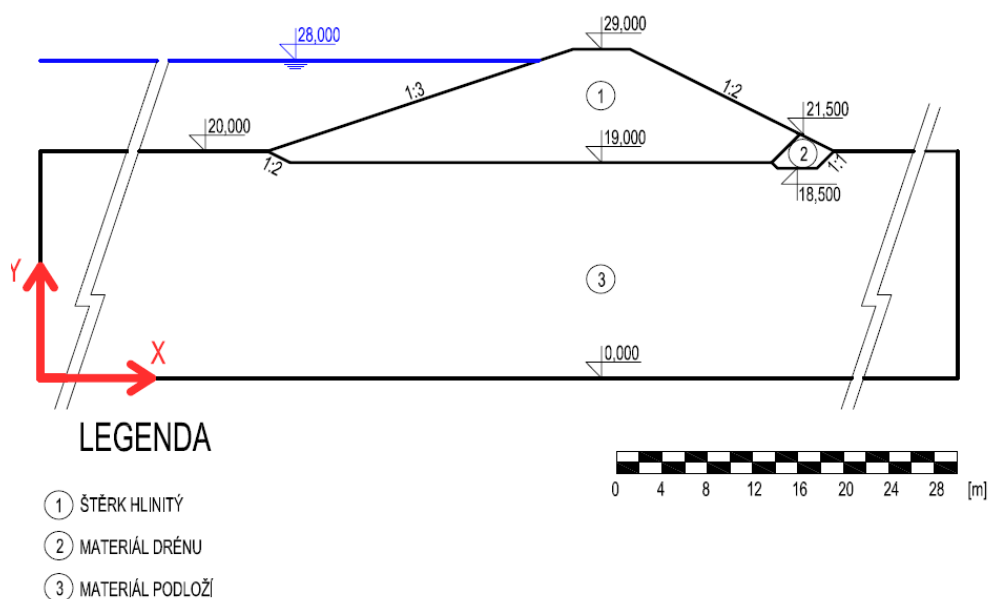
4.1 Sklony svahů vybraných homogenních hrází

Nehomogenní hráze	Materiál		Sklon	
	Těsnicí část	Stabilizační část	Vzdušný	Návodní
	Cl - Cl Jíl s nízkou plasticitou	SP - Písek špatně zrněný	1:2,2	1:3,4
	SM - Písek hlinitý	GW - Štěrk dobře zrněný	1:2	1:3,2
	Cl - Cl Jíl s nízkou plasticitou	SP - Písek špatně zrněný	1:1,75	1:3

4.2 Sklony svahů vybraných nehomogenních hrází

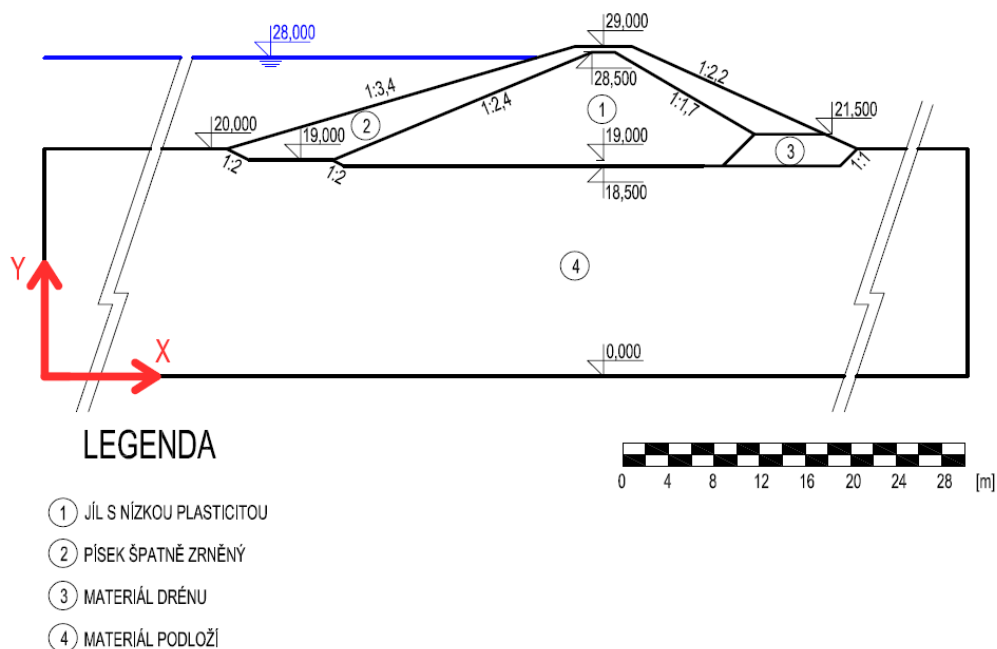
Tloušťka podloží pod hrázemi byla volena jako minimálně dvojnásobek výšky hráze. U všech hrází byla tloušťka podloží zvolena na 20m. Výpočtová délka podloží před a za hrází byla dle doporučení zvolena jako jednonásobek délky hrází. To znamená, že před i za tělesem hráze bude minimálně 1 násobek délky hráze u paty.

HOMOGENNÍ HRÁZ ZE ŠTĚRKU HLINITÉHO



4.1 Vzorová geometrie homogenní hráze

NEHOMOGENNÍ HRÁZ STŘEDNÍ TĚSNĚNÍ ŠIROKÉ - JÍL S NÍZKOU PLASTICITOU STABILIZAČNÍ ČÁST - PÍSEK ŠPATNĚ ZRNĚNÝ



4.2 Vzorová geometrie nehomogenní hráze

Více geometrií jednotlivých hrází obsahují přílohy k této diplomové práci.

4.2 POUŽITÉ MATERIÁLY

Většina parametrů zemin je obsažena v knihovně materiálů programu Plaxis 2D, některé parametry je ale nutné zadat ručně. Jedná se především o objemovou tíhu zeminy, modul pružnosti, kohezi, úhel vnitřního tření a Poissonovo číslo. Tyto hlavní parametry byly voleny podle norem ČSN 75 2410 – Malé vodní nádrže a ČSN 73 1001 – Zakládání staveb, základová půda pod plošnými základy. Zvolené parametry jsou uvedeny v tabulce materiálů pro homogenní a nehomogenní hráze na konci této kapitoly. Z důvodu zjednodušení výpočtu bylo Poissonovo číslo všech materiálů voleno jako 0,3.

Poslední z parametrů potřebných pro výpočet byl úhel dilatance, ten byl ale z důvodu nedostatku informací o tomto parametru volen 0.

4.2.1 Materiály použité při modelování hrází

Většina z hrází těchto malých nádrží je tvořena z homogenních materiálů. Pro tuto diplomovou práci tedy bylo vybráno 5 homogenních hrází a pouze 3 nehomogenní. Pro homogenní hráze bylo vybráno 5 základních zemin, jedná se o:

1. *GM – Štěrka hlinitý*
2. *SM – Písek hlinitý*
3. *GC – Štěrka jílový*
4. *SC – Písčité jíl*
5. *Cl - Jíl s nízkou plasticitou*

Pro nehomogenní hráze byly vybrány podobné zeminy jako pro homogenní, ale u nehomogenních budou tyto tvořit těsnicí část. Byly vybrány dvě varianty se středním těsněním širokým a jedna varianta se středním těsněním úzkým.

1. *Cl – Jíl s nízkou plasticitou pro těsnicí část (široké těsnění) a SP – písek špatně zrněný pro stabilizační část.*
2. *SM – Písek hlinitý pro těsnicí část (široké těsnění) a GW – štěrka dobře zrněný pro stabilizační část.*
3. *Cl – Jíl s nízkou plasticitou pro těsnicí část (úzké těsnění) a SP – písek špatně zrněný pro stabilizační část.*

1) Štěrka hlinitý GM

Tento materiál je normou ČSN 75 2410 klasifikován jako výborný pro homogenní hráze, velmi vhodný pro těsnicí část nehomogenních hrází a málo vhodný pro stabilizační část nehomogenních hrází.

Dle ČSN 75 2410 má tento materiál následující vlastnosti:

Třída:	G4
Obsah jemnozrnné frakce (<0,06mm)	15 – 35%
Na diagramu plasticity je pod čarou A	

GM	Značka [Jednotka]	ČSN 75 2410	ČSN 73 1001
Objemová Hmotnost	γ [kN/m ³]	17,0 až 20,16	19,00
Soudržnost	c [kPa]	5,00	0 až 8
Úhel vnitřního tření	φ [°]	34,00	30 až 35
Modul pružnosti	E [MPa]	-	60 až 80
Hydraulická vodivost	k [m/s]	$8,0 \cdot 10^{-5}$ až $8,0 \cdot 10^{-10}$	-
Poissonův součinitel	ν [-]	-	0,30

4.3 Srovnání vlastností zemin de ČSN 75 2410 a ČSN 73 1001

2) Písek hlinitý SM

Tento materiál je podle normy klasifikován jako vhodný pro homogenní hráze, vhodný pro těsnicí část nehomogenních hrází a málo vhodný pro stabilizační část nehomogenních hrází.

Třída: S4

Obsah jemnozrnné frakce (<0,06mm) 15 – 35%

SM	Značka [Jednotka]	ČSN 75 2410	ČSN 73 1001
Objemová Hmotnost	γ [kN/m ³]	12,3 až 19,0	18,00
Soudržnost	c [kPa]	5,00	0 až 10
Úhel vnitřního tření	φ [°]	34,00	28 až 30
Modul pružnosti	E [MPa]	-	5 až 15
Hydraulická vodivost	k [m/s]	$1,0 \cdot 10^{-5}$ až $1,0 \cdot 10^{-10}$	-
Poissonův součinitel	ν [-]	-	0,30

4.4 Srovnání vlastností zemin de ČSN 75 2410 a ČSN 73 1001

3) Štěrk jílový GC

Tento materiál je normou ČSN 75 2410 klasifikován jako výborný pro homogenní hráze, velmi vhodný pro těsnicí část nehomogenních hrází a málo vhodný pro stabilizační část nehomogenních hrází.

Dle ČSN 75 2410 má tento materiál následující vlastnosti:

Třída: G5

Obsah jemnozrnné frakce (<0,06mm) 15 – 35%

Na diagramu plasticity je nad čarou A

GC	Značka [Jednotka]	ČSN 75 2410	ČSN 73 1001
Objemová Hmotnost	γ [kN/m ³]	-	18,00
Soudržnost	c [kPa]	5,00	2 až 10
Úhel vnitřního tření	φ [°]	27,00	28 až 32
Modul pružnosti	E [MPa]	-	40 až 60
Hydraulická vodivost	k [m/s]	$1,0 \cdot 10^{-4}$ až $1,0 \cdot 10^{-9}$	-
Poissonův součinitel	ν [-]	-	0,30

4.5 Srovnání vlastností zemin de ČSN 75 2410 a ČSN 73 1001

4) Písčité jíl SC

Tento materiál je normou ČSN 75 2410 klasifikován jako velmi vhodný pro homogenní hráze, výborný pro těsnicí část nehomogenních hrází a nevhodný pro stabilizační část nehomogenních hrází.

Dle ČSN 75 2410 má tento materiál následující vlastnosti:

Třída: S5
Obsah jemnozrnné frakce (<0,06mm) 15 – 35%

Na diagramu plasticity je nad čarou A

SC	Značka [Jednotka]	ČSN 75 2410	ČSN 73 1001
Objemová Hmotnost	γ [kN/m ³]	-	18,50
Soudržnost	c [kPa]	6,00	10 až 44
Úhel vnitřního tření	φ [°]	34,00	0 až 14
Modul pružnosti	E [MPa]	-	2,5 až 12
Hydraulická vodivost	k [m/s]	$1 \cdot 10^{-7}$ až $5 \cdot 10^{-10}$	-
Poissonův součinitel	ν [-]	-	0,35

4.6 Srovnání vlastností zemin de ČSN 75 2410 a ČSN 73 1001

5) Cl – Jíl s nízkou plasticitou

Tento materiál je normou ČSN 75 2410 klasifikován jako vhodný pro homogenní hráze, velmi vhodný pro těsnicí část nehomogenních hrází a nevhodný pro stabilizační část nehomogenních hrází.

Dle ČSN 75 2410 má tento materiál následující vlastnosti:

Třída: F6
Obsah jemnozrnné frakce (<0,06mm) > 65%

Na diagramu plasticity je nad čarou A

CI	Značka [Jednotka]	ČSN 75 2410	ČSN 73 1001
Objemová Hmotnost	γ [kN/m ³]	-	21,00
Soudržnost	c [kPa]	5,00	8 až 28
Úhel vnitřního tření	φ [°]	25,00	0 až 18
Modul pružnosti	E [MPa]	-	1,5 až 20
Hydraulická vodivost	k [m/s]	$1 \cdot 10^{-7}$ až $1 \cdot 10^{-10}$	-
Poissonův součinitel	ν [-]	-	0,40

4.7 Srovnání vlastností zemin de ČSN 75 2410 a ČSN 73 1001

6) GW – Štěrk dobře zrněný

Tento materiál je normou ČSN 75 2410 klasifikován jako nevhodný pro homogenní hráze, nevhodný pro těsnicí část nehomogenních hrází a výborný pro stabilizační část nehomogenních hrází.

Dle ČSN 75 2410 má tento materiál následující vlastnosti:

Třída: G1

Obsah jemnozrnné frakce (<0,06mm) < 5%

GW	Značka [Jednotka]	ČSN 75 2410	ČSN 73 1001
Objemová Hmotnost	γ [kN/m ³]	15,8 - 19,7	21,00
Soudržnost	c [kPa]	0,00	0,00
Úhel vnitřního tření	φ [°]	44,00	36 až 44
Modul pružnosti	E [MPa]	-	250 až 500
Hydraulická vodivost	k [m/s]	$5 \cdot 10^{-4}$ až $7 \cdot 10^{-5}$	-
Poissonův součinitel	ν [-]	-	0,20

4.8 Srovnání vlastností zemin de ČSN 75 2410 a ČSN 73 1001

7) SP – Písek špatně zrněný

Tento materiál je normou ČSN 75 2410 klasifikován jako nevhodný pro homogenní hráze, nevhodný pro těsnicí část nehomogenních hrází a výborný pro stabilizační část nehomogenních hrází.

Dle ČSN 75 2410 má tento materiál následující vlastnosti:

Třída: G1

Obsah jemnozrnné frakce (<0,06mm) < 5%

SP	Značka [Jednotka]	ČSN 75 2410	ČSN 73 1001
Objemová hmotnost	γ [kN/m^3]	13,5 až 19,6	18,50
Soudržnost	c [kPa]	0,00	0,00
Úhel vnitřního tření	φ [$^\circ$]	37,00	32 až 37
Modul pružnosti	E [MPa]	-	15 až 50
Hydraulická vodivost	k [m/s]	$2 \cdot 10^{-4}$ až $1 \cdot 10^{-6}$	-
Poissonův součinitel	ν [-]	-	0,28

4.9 Srovnání vlastností zemin dle ČSN 75 2410 a ČSN 73 1001

4.2.2 Materiál použitý při modelování drénu

Vlastnosti materiálu drénu vycházejí z předpokladu, že v drénu se bude nacházet zemina s poměrně velkou hydraulickou vodivostí v porovnání s materiálem hráze, případně jejím jádrem. Dle těchto vlastností se může usuzovat, že se jedná o některý z druhů šterku.

Materiál drénu byl zvolen pro každý z výpočtu stejný a to z důvodu lepšího pozdějšího srovnání mezi sebou.

Materiálové parametry drénu:

<i>Objemová hmotnost:</i>	$20,0 \text{ kN/m}^3$
<i>Hydraulická vodivost:</i>	$5,0 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$
<i>Úhel vnitřního tření:</i>	44°
<i>Soudržnost:</i>	0 kN/m^2
<i>Modul pružnosti:</i>	70 MPa
<i>Poissonův součinitel:</i>	$0,3$

4.2.3 Materiál použitý při modelování podloží

Materiál podloží byl volen z důvodu zjednodušení volen stejný ve všech vrstvách. Byl vybrán materiál s poměrně malou objemovou hmotností a malou hydraulickou vodivostí. Dle normových tabulek by se mohlo jednat o některý z druhů písku s příměsí jemné jílové, nebo hlinité frakce. Tento materiál má svými vlastnostmi evokovat nepropustné podloží s dostatečnou smykovou únosností.

Materiál podloží je stejně jako materiál drénu volen stejně pro všechny výpočtové možnosti.

Materiálové parametry podloží:

<i>Objemová hmotnost:</i>	$17,0 \text{ kN/m}^3$
<i>Hydraulická vodivost:</i>	$1,0 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$
<i>Úhel vnitřního tření:</i>	35°
<i>Soudržnost:</i>	8 kN/m^2
<i>Modul pružnosti:</i>	50 MPa
<i>Poissonův součinitel:</i>	$0,3$

	Materiál	Vhodnost dle ČSN 75 2410	Objemová hmotnost [kN/m³]	Hydraulická vodivost [m/s]	Úhel vnitřního tření [°]	Soudržnost [kPa]	Modul pružnosti [MPa]	Poissonův součinitel [-]
Homogenní hráze								
	GM Štěrka hlinitý	výborná	20	$1,0 \cdot 10^{-6}$	34	5	70	0,3
	SM Písek hlinitý	vhodná	18	$1,0 \cdot 10^{-7}$	30	6	10	0,3
	GC Štěrka jílovitý	vhodná	20,5	$5,0 \cdot 10^{-7}$	29	6	50	0,3
	SC Písčité jíl	výborná	18,5	$1,0 \cdot 10^{-8}$	27	7	10	0,3
	Cl - Cl Jíl s nízkou plasticitou	vhodná	21	$1,0 \cdot 10^{-9}$	21	8	5	0,3
Nehomogenní hráze								
Těsnicí část	SM Písek hlinitý	vhodná	18	$1,0 \cdot 10^{-7}$	30	6	10	0,3
	Cl - Cl Jíl s nízkou plasticitou	velmi vhodná	21	$1,0 \cdot 10^{-9}$	21	8	5	0,3
Stabilizační část	SP Písek špatně zrněný	vhodná	18,5	$5,0 \cdot 10^{-5}$	35	0	70	0,3
	GW Štěrka dobře zrněný	výborná	19,5	$1,0 \cdot 10^{-4}$	44	0	120	0,3
Materiály drénu a podloží								
	Drén	-	20	$5,0 \cdot 10^{-4}$	44	0	70	0,3
	Podloží	-	17	$1,0 \cdot 10^{-8}$	35	8	50	0,3

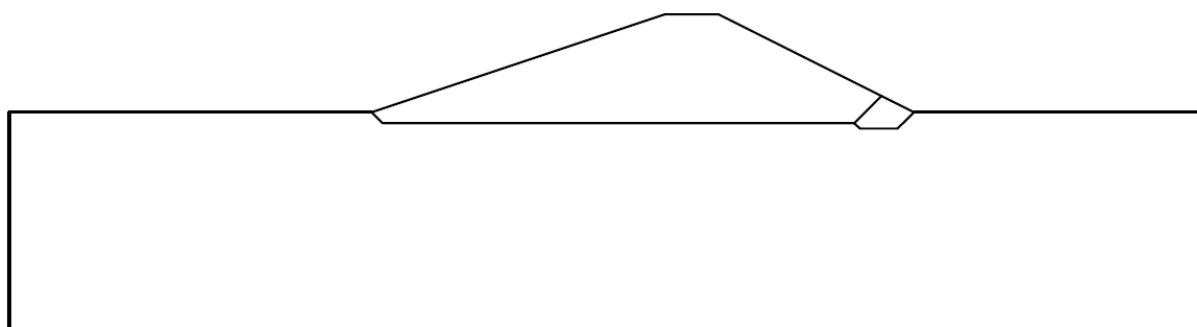
4.10 Materiálové vlastnosti zemin použitých během výpočtu

4.3 ZATĚŽOVACÍ STAVY

Pro tuto parametrickou studii byly určeny 4 zatěžovací stavy, pro které byl vypočítán stupeň bezpečnosti.

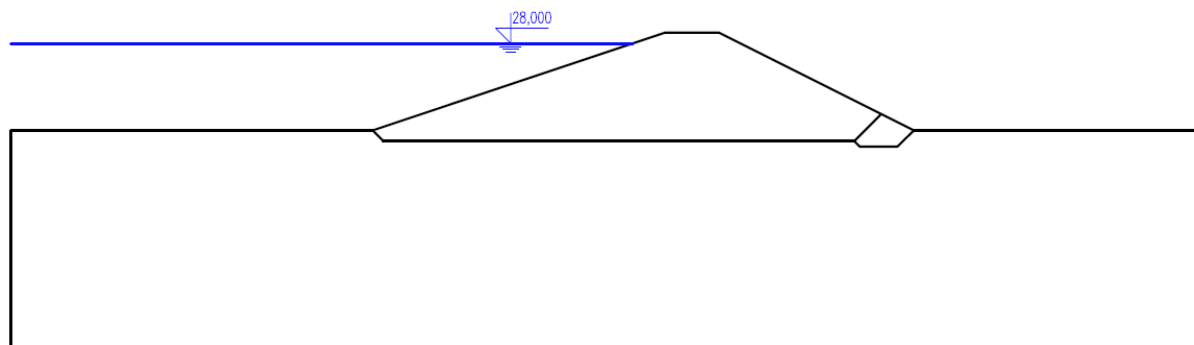
- 1) I. Zatěžovací stav – Prázdná nádrž
- 2) II. Zatěžovací stav – Plná nádrž, hladina 1m pod korunou hráze ustálené rovnoměrné proudění.
- 3) III. Zatěžovací stav – Pokles hladiny vody v nádrži. Hladina klesá o 1m za den až na úroveň 1m. To znamená pokles o 7m za 7dní.
- 4) IV. Zatěžovací stav – Rychlý pokles hladiny vody v nádrži. Hladina klesá o 7m za jeden den.

I. ZATĚŽOVACÍ STAV – PRÁZDNÁ NÁDRŽ



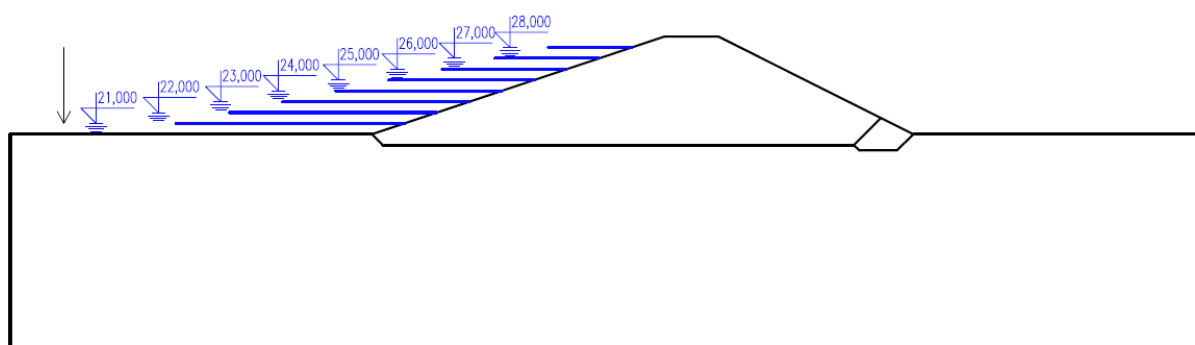
4.3 I. Zatěžovací stav - Prázdná nádrž

II. ZATĚŽOVACÍ STAV, PLNÁ NÁDRŽ HLADINA 1m POD KORUNOU HRÁZE



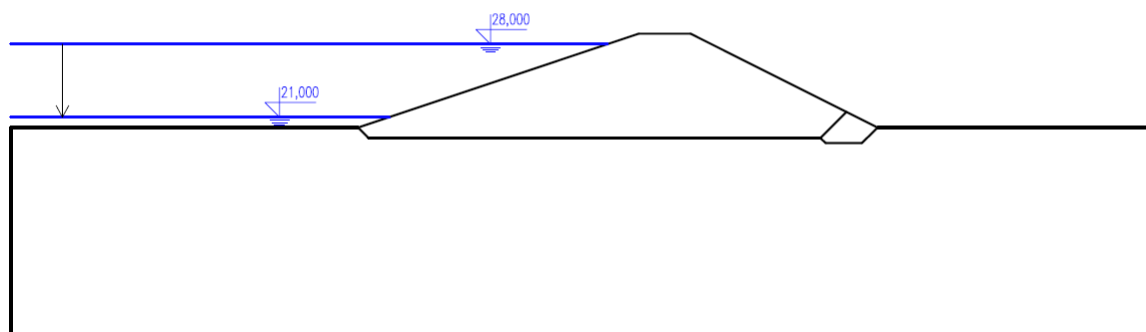
4.4 II. Zatěžovací stav – Plná nádrž, hladina 1m pod korunou hráze ustálené rovnoměrné proudění.

III. ZATĚŽOVACÍ STAV, POKLES HLADINY 7m/7dní
v=1m/den



4.5 III. Zatěžovací stav – Pokles hladiny vody v nádrži. Hladina klesá o 1m za den až na úroveň 1m. To znamená pokles o 7m za 7dní.

IV. ZATĚŽOVACÍ STAV, POKLES HLADINY 7m/den
v=7m/den



4.6 IV. Zatěžovací stav – Rychlý pokles hladiny vody v nádrži. Hladina klesá o 7m za jeden den.

4.4 VÝPOČETNÍ MODEL

4.4.1 Okrajové podmínky

Při výpočtu programem Plaxis je možné definovat tři typy okrajových podmínek a to horizontální, vertikální a totální.

Horizontální posuny

Je zabráněno vodorovným posunům, program automaticky vkládá tuto podmínku na boční hrany modelu.

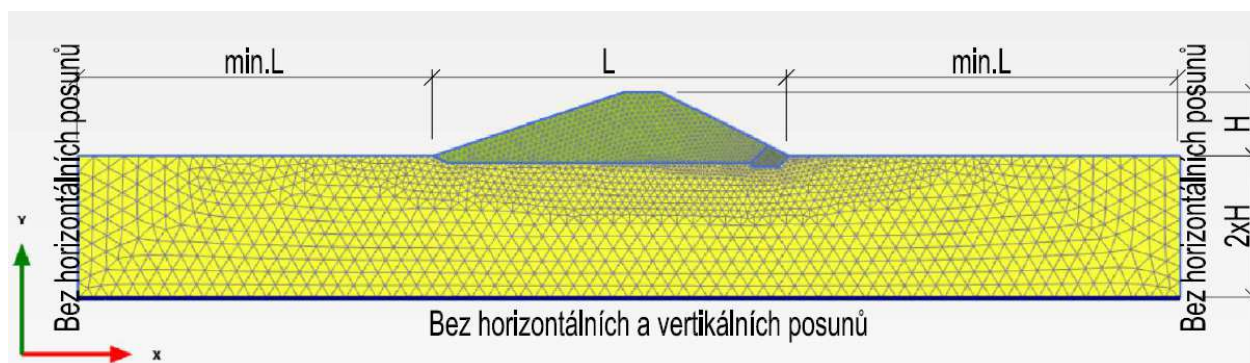
Vertikální posuny

Je zabráněno vertikálním posunům

Žádné posuny

Je zabráněno jak horizontálním tak vertikálním posunům. Tuto podmínku program automaticky vkládá na dolní hranu modelu.

Jelikož okrajové podmínky mohou negativně ovlivňovat výsledky výpočtů, proto je důležité volit dostatečné vzdálenosti mezi okrajovými podmínkami a místy výpočtu.



4.7 Okrajové podmínky výpočtu

4.4.2 Geometrie hrází

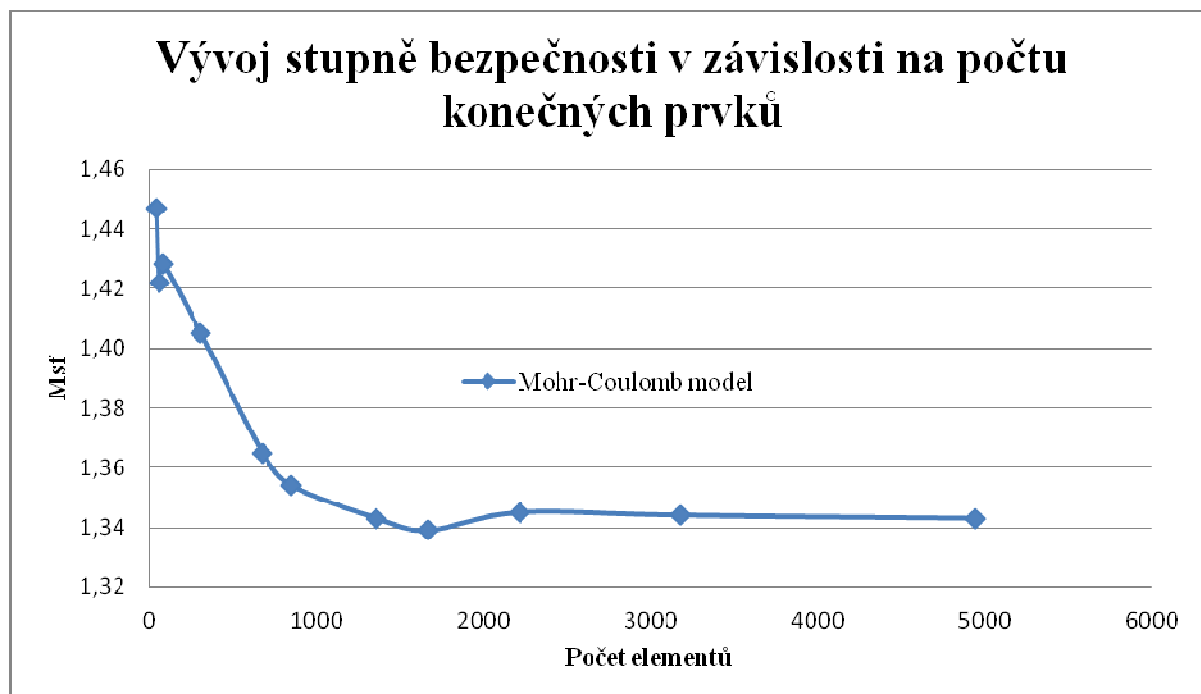
Do programu Plaxis byly zadány geometrie jednotlivých hrází, dle předpisu, který je popsán výše. Geometrii lze zadat buď ručně, nebo vložit přímo z programu AutoCad.

4.4.3 Materiálové charakteristiky

Pro jednotlivé výpočtové verze byly zadány materiálové charakteristiky, které byly vidět v práci výše. Program Plaxis obsahuje paletu materiálů, ze kterých můžeme vybírat, ale pro tuto studii bylo nutné materiály pozměnit podle svých představ a nadefinovat nové s parametry dle tabulky.

4.4.4 Sít' mesh

Pro výpočet programem Plaxis je použito patnácti uzlových výpočetních prvků. Pro tyto prvky byla vypracována parametrická studie vývoje stupně bezpečnosti, která určila hustotu sítě konečných prvků.



4.8 Graf parametrické studie vývoje stupně bezpečnosti

Na grafu výše je dobře vidět vliv počtu konečných prvků na vývoj stupně bezpečnosti. Stupeň bezpečnosti klesá od cca 1,45 při zhruba padesáti konečných prvcích až do cca 1,34 při více než 3000 konečných prvcích. Poté už se stupeň bezpečnosti téměř nemění. Proto budou všechny počítané varianty v této práci obsahovat vždy více než 3000 konečných prvků.

4.4.5 Hydraulické podmínky

Před výpočtem bylo nutné zvolit hydraulické podmínky pro výpočtové stavy.

U prvního zatěžovacího stavu nebyla zvolena žádná hladina, jelikož se jedná o prázdnou nádrž.

Pro druhý zatěžovací stav byla volena hladina vody v nádrži 1m pod korunou hráze, tj. 8m vody v nádrži. Průchod vody hrází byl zvolen lineárně do drénu a v drénu byl určen 0,7m pod zemí na části modelu od drénu do konce sledované geometrie.

Pro třetí zatěžovací stav platí to samé s počáteční hladinou jako pro druhý stav. Je pouze přidána podmínka lineárního klesání vody v nádrži a to 1m poklesu za den. Tato podmínka je opakována po dobu 7 dní, to znamená, že hladina vody v nádrži poklesne z počáteční hodnoty 8m na konečnou hodnotu 1m vody v nádrži.

Pro čtvrtý zatěžovací stav platí stejná výchozí pozice jako pro třetí. Rozdíl je v rychlosti klesání vodní hladiny. Zde hladina poklesne poměrně rychleji a to o 7m za 1den.

5 VÝSLEDKY ŘEŠENÍ

Jako grafické výstupy z řešení těchto parametrických studií byly zvoleny jednotlivé přílohy, které jsou stejné pro každou variantu hráze. První číslo vždy označuje číslo materiálu, druhé číslo označuje číslo přílohy.

5.1 ČLENĚNÍ PŘÍLOH

Příloha 1.1. Vzorový řez hrází

Příloha 1.2. Matematický model

Příloha 1.3. Piezometrické výšky vody v hrázi

- II. Z.S. Plná nádrž
- III. Z.S. Prázdňení nádrže 1m/den
- IV. Z.S. Prázdňení nádrže 7m/den

Příloha 1.4. Utvořené smykové plochy

- I. a II. Z.S. Suchá a plná nádrž
- III. Z.S. Prázdňení nádrže 1m/den
- IV. Z.S. Prázdňení nádrže 7m/den

5.2 OBSAH PŘÍLOH

U příloh 1.1. až 8.1. se jedná o vzorové řezy hrázemi s ohraničením jednotlivých materiálů. Tato příloha také obsahuje nejdůležitější výškové kóty.

Přílohy 1.2. až 8.2. nám zobrazují celkový pohled na výpočtovou síť, obsahují údaje o počtu prvků a základní rozměry jednotlivých výpočtových modelů.

V přílohách 1.3. až 8.3. můžeme sledovat piezometrické výšky vody v nádrži, které jsou vypočítány pomocí sacích tlaků. Sací tlaky byly zvoleny z toho důvodu, že program zde lépe docílí výsledků s polohou hladiny vody v hrázi. Přítomnost sacích tlaků se dá velmi jednoduše vizuálně ověřit pomocí izolinií piezometrické výšky. Tyto linie nepokračují po průchodu hladinou vodorovně ale svisle kolmo na linie modelu.

V přílohách 1.4. až 8.4. byly stupně bezpečnosti vypočítány bez pomoci sacích tlaků. A to z důvodu posunutí výsledků na stranu bezpečnosti. Jelikož sací tlaky mohou někdy nepříznivě ovlivňovat výsledek stupně bezpečnosti a to tím, že u sebe drží zrnka zeminy. V těchto případech tedy vyjde stupeň bezpečnosti vyšší, než v případech kdy je počítán bez sacích tlaků. Přítomnost sacích tlaků není v hrázi vždy zaručena, proto bylo rozhodnuto vypočítat stupeň bezpečnosti bez těchto sacích tlaků.

Výsledky řešení jsou uvedeny v následující tabulce 5.1. V tabulce je zde uveden materiál hráze, u nehomogenních hrází poloha těsnění hráze, a výsledný nejnižší stupeň bezpečnosti pro daný zatěžovací stav plus svah, na kterém se vytvořila smyková plocha.

5.3 VÝSLEDKY PRÁCE

5.3.1 I. Zatěžovací stav

Pro I. zatěžovací stav „prázdná nádrž“ by měly svahy hrází dle normy ČSN 75 2410 splňovat stupeň bezpečnosti 1,5. Pro tento zatěžovací stav byly podle předpokladu porušeny pouze vzdušní svahy hrází. Tyto se porušily, jelikož mají oproti návodním prudší sklony a tudíž i menší stabilitu. Kritérium stupně bezpečnosti splnily všechny svahy hrází mimo hráz, která byla tvořena jílem s nízkou plasticitou a nehomogenní hráz se středním těsněním úzkým. Stupně bezpečnosti se pohybují v rozmezí od 1,35 (Nehomogenní hráz, úzké těsnění Sp - Cl) po 1,94 (nehomogenní hráz široké těsnění SM – GW).

5.3.2 II. Zatěžovací stav

Pro II. zatěžovací stav „plná nádrž“ platí dle normy stejný stupeň bezpečnosti. Tento splňuje z homogenních hrází pouze štěrk hlinitý a obě nehomogenní hráze s širokým těsněním. Nejmenší stupeň stability při II. zatěžovacím stavu má opět jíl s nízkou plasticitou a to 1,29.

Podle předpokladu se opět porušují pouze vzdušní svahy těchto hrází. Vzhledem k tomu že návodní svahy jsou mírnější a přitížené masou vody. U vzdušných svahů došlo pouze k poklesu stupně stability a to z důvodu proudění vody hrází.

5.3.3 III. Zatěžovací stav

Pro III. zatěžovací stav „prázdnění 7m/7dní“ byla vypočtena následující škála stupňů bezpečnosti od 1,22 pro písek hlinitý po 1,71 u nehomogenní hráze s širokým těsněním SM – GW. U tohoto zatěžovacího stavu již lze pozorovat větší rozptyl naměřených hodnot i různé porušené svahy. Jednalo se ve 4 případech o svah návodní a ve 4 o svah vzdušní.

5.3.4 IV. Zatěžovací stav

IV. zatěžovací stav byl zvolen z důvodu porovnání různých rychlostí klesání hladiny vody v nádrži. Při tomto zatěžovacím stavu taktéž došlo k výpočtu nejmenšího stupně stability a to 1,15 pro písek hlinitý. Nejvyššího stupně stability dosáhla opět nehomogenní hráz SM – GW a to 1,49. V pěti případech byl porušen svah návodní a v ostatních případech svah vzdušní.

Typ hráze	Materiál hráze	Poloha těsnění	Zatěžovací stav	Stupeň bezpečnosti	Svah
Homogenní	GM - Štěrk hlinitý	-	I. Z.S.	1,80	Vzdušný
			II. Z.S.	1,50	Vzdušný
			III. Z.S.	1,50	Vzdušný
			IV. Z.S.	1,47	Návodní
	SM - Písek hlinitý		I. Z.S.	1,69	Vzdušný
			II. Z.S.	1,38	Vzdušný
			III. Z.S.	1,22	Návodní
			IV. Z.S.	1,15	Návodní
	GC - Štěrk jílový		I. Z.S.	1,57	Vzdušný
			II. Z.S.	1,34	Vzdušný
			III. Z.S.	1,28	Vzdušný
			IV. Z.S.	1,32	Vzdušný
	SC - Písečný jíl		I. Z.S.	1,59	Vzdušný
			II. Z.S.	1,42	Vzdušný
			III. Z.S.	1,26	Návodní
			IV. Z.S.	1,23	Návodní
	CI - CI Jíl s nízkou plasticitou		I. Z.S.	1,43	Vzdušný
			II. Z.S.	1,29	Vzdušný
			III. Z.S.	1,29	Vzdušný
			IV. Z.S.	1,28	Vzdušný
Nehomogenní hráze	CI - Jíl s nízkou plasticitou, SP - Písek špatně zrněný	Střední těsnění široké	I. Z.S.	1,67	Vzdušný
			II. Z.S.	1,51	Vzdušný
			III. Z.S.	1,26	Návodní
			IV. Z.S.	1,22	Návodní
	SM - Písek hlinitý, GW - Štěrk dobře zrněný	Střední těsnění široké	I. Z.S.	1,94	Vzdušný
			II. Z.S.	1,76	Vzdušný
			III. Z.S.	1,71	Návodní
			IV. Z.S.	1,49	Návodní
	CI - Jíl s nízkou plasticitou, SP - Písek špatně zrněný	Střední těsnění úzké	I. Z.S.	1,35	Vzdušný
			II. Z.S.	1,33	Vzdušný
			III. Z.S.	1,31	Vzdušný
			IV. Z.S.	1,32	Vzdušný

5.1 Vypočtené stupně bezpečnosti pro vybrané varianty hrází

6 ZÁVĚŘ A DISKUZE

Cílem této diplomové práce bylo stanovit bezpečnostní rezervu stability svahů pro pět vybraných typů homogenních hrází a tří nehomogenních hrází MVN různého uspořádání vycházejícího z ČSN 75 2410.

Homogenní hráze

Homogenní hráz ze štěrku hlinitého

I. Zatěžovací stav

Pro tento zatěžovací stav byl vypočítán stupeň bezpečnosti $M_{sf} = 1,8$. Jedná se o dostatečnou rezervu v porovnání se stupněm bezpečnosti, který předepisuje norma. Tento výborný výsledek plyne především z velkého úhlu vnitřního tření a relativně velké soudržnosti.

II. Zatěžovací stav

Pro tento zatěžovací stav vyšel stupeň bezpečnosti $M_{sf} = 1,5$. Tímto výsledkem splňuje hodnotu danou normou a to 1,5. Stupeň bezpečnosti se snížil z důvodu proudění vody v hrázi. Voda má tendenci vytlačet částčky zeminy na vzdušný svah, čímž snižuje jeho stabilitu.

III. Zatěžovací stav

Při pomalém klesání vody v nádrži byl vypočítán nejnižší stupeň bezpečnosti pro prázdnění za 1 den. Tento je stejný jako při II. zatěžovacím stavu a to $M_{sf} = 1,5$. Při prázdnění se měl stupeň bezpečnosti tendenci zvětšovat, toto je dáno poklesem pórových tlaků v hrázi v důsledku rychlého odvodnění hráze. Materiál hráze má oproti ostatním největší hydraulickou vodivost a během pomalého prázdnění se stihl nejlépe odvodnit.

IV. Zatěžovací stav

Při rychlém klesání vody v nádrži byl nejmenší stupeň bezpečnosti tj. $M_{sf} = 1,47$ naměřen na návodním svahu této hráze při poklesu 7m za 1 den. Dle piezometrických výšek si můžeme povšimnout, že hráz se nestíhá odvodňovat tak rychle jako při pomalém klesání, toto vytváří výronovou plochu na návodním líci a takto snižuje jeho stupeň stability.

Chování této homogenní hráze bylo ovlivněno taktéž relativně vysokou objemovou hmotností. Při provedení výpočtu s nižší objemovou hmotností se smykové plochy přemístily na návodní svah již během III. zatěžovacího stavu.

Homogenní hráz z písku hlinitého

I. Zatěžovací stav

Výsledný stupeň bezpečnosti činil $M_{sf} = 1,69$, čímž tato hráz splňuje normové stupně bezpečnosti. Smyková plocha se opět tvoří na prudším vzdušném svahu.

II. Zatěžovací stav

Pro plnou nádrž s ustáleným prouděním byla vypočítána hodnota stupně bezpečnosti $M_{sf} = 1,38$. Můžeme pozorovat pokles stupně bezpečnosti oproti I. zatěžovacímu stavu.

III. Zatěžovací stav

Při pomalém klesání vody si můžeme povšimnout pomalejšího odvodňování hráze v důsledku nižší hydraulické vodivosti. Pórové tlaky v hrázi zůstávají relativně vysoké a tvoří se výronové plochy na návodní straně. Z tohoto důvodu byl nejnižší stupeň bezpečnosti $M_{sf} = 1,22$ vypočítán pro návodní svah při poklesu vody za 7dní.

IV. Zatěžovací stav

Pro tento zatěžovací stav platí ty samé podmínky co pro stav předešlý. Smykové plochy se tvoří taktéž na návodním líci hráze a to s menším stupněm bezpečnosti tj. $M_{sf} = 1,15$. Tento zatěžovací stav bude pro hráz logicky horší, jelikož dochází k tak rychlému poklesu vody v nádrži a pomalejšímu reagování hladiny vody v hrázi.

Homogenní hráz ze štěrku jílového

I. Zatěžovací stav

Výsledný stupeň bezpečnosti pro tento zatěžovací stav činil $M_{sf} = 1,57$. Hráz se porušovala opět na vzdušním svahu, nižší stupeň bezpečnosti než v předchozích dvou případech je dán stejným sklonem vzdušního svahu, ale nižším úhlem vnitřního tření.

II. Zatěžovací stav

Pro tento zatěžovací stav byl vypočítán stupeň bezpečnosti $M_{sf} = 1,34$. Opět došlo ke snížení oproti zatěžovacímu stavu se suchou nádrží, vlivem proudění vody hrází.

III. Zatěžovací stav

Při pomalém klesání se smykové plochy držely opět na vzdušním líci, který byl z pohledu bezpečnosti neméně výhodný. Na návodním se sice tvořily výronové plochy, ale jeho větší sklon (1:3,3), zabránil porušení tohoto líce. Stupně bezpečnosti na vzdušním líci mírně stoupaly. Nejnižší stupeň bezpečnosti byl vypočítán při klesnutí vody za 1den tj. $M_{sf} = 1,28$.

IV. Zatěžovací stav

Platí zde, co již bylo napsáno výše u III. zatěžovacího stavu. Pouze zde s poklesem vody mírně klesají i stupně stability. V tomto případě se jedná pouze o rozdíl v důsledku zaokrouhlování.

Pro případ této hráze by k porušení návodního svahu mohlo dojít taktéž při snížení objemové hmotnosti, či při zvýšení rychlosti prázdnění.

Homogenní hráz z písčitého jílu

I. Zatěžovací stav

Výsledný stupeň bezpečnosti pro I. zatěžovací stav vychází $M_{sf} = 1,59$. Smyková plocha se tvoří na vzdušním líci, jelikož tento je prudší než návodní.

II. Zatěžovací stav

Pro tento zatěžovací stav byl vypočítán stupeň bezpečnosti $M_{sf} = 1,42$. Jedná se o proudění vody hrází, proto bude stupeň bezpečnosti vycházet nižší, než u suché hráze. Návodní svah je relativně mírný (1:3,4) a ještě přitěžován masou vody v nádrži.

III. Zatěžovací stav

Při pomalém klesání se smykové plochy tvořily na vzdušném líci do 4 dne klesání. Při tomto klesání měly i stejný stupeň bezpečnosti. Od 5 dne se přesunuly na svah návodní a stupeň bezpečnosti začal pomalu klesat až na hodnotu $M_{sf} = 1,26$ při sedmém dni. Hladina vody v hrázi v tomto případě držela téměř stejnou polohu, můžeme si povšimnout výronových ploch na návodním líci hráze. Tato vysakující voda snižovala stabilitu návodního svahu.

IV. Zatěžovací stav

Při rychlém klesání se hladina v hrázi téměř neměnila, což vyústilo k tvorbě velkých výronových ploch na návodním svahu hráze. Stupeň bezpečnosti začal klesat stejně jako při III. zatěžovacím stavu až na návodní stran hráze a klesl až na hodnotu $M_{sf} = 1,23$ u poklesu vody za 1 den.

Homogenní hráz z jílu s nízkou plasticitou

I. Zatěžovací stav

Výsledný stupeň bezpečnosti byl pro tento zatěžovací stav vypočítán jako $M_{sf} = 1,43$. Jako jediná z homogenních hrází tedy tato hráz nesplnila podmínku z normy a to stupeň bezpečnosti 1,5. Dle normy se jedná o hráz „vhodnou“ pro homogenní hráze, z tohoto vyplývá taktéž sklon vzdušního svahu, který je nejmírnější ze zkoumaných (1:2,2).

II. Zatěžovací stav

Pro tento zatěžovací stav byl vypočítán stupeň bezpečnosti $M_{sf} = 1,29$. Při ustáleném proudění vody v hrázi vychází stupeň bezpečnosti vždy nižší než při suché hrázi. Voda při proudění má tendenci vytlačet částčky zeminy na vzdušném svahu a tudíž snižovat jeho stupeň bezpečnosti. Návodní svah je přitížen masou vody a v tomto případě je ještě navíc nejmírnější (1:3,7), není tedy možné, aby měl nižší stupeň bezpečnosti než svah vzdušní.

III. Zatěžovací stav

Během pomalého klesání zůstávaly stupně bezpečnosti stejné, pouze po sedmi dnech se stupeň bezpečnosti mírně zvýšil, ale spíše příčinou zaokrouhlování. Nejmenší stupeň bezpečnosti vychází $M_{sf} = 1,29$. Při tomto zatěžovacím stavu je vidět že voda v hrázi prakticky neklesá. Výronová plocha se tvoří na návodním líci, z důvodu toho, jak se voda z hráze tlačí ven. Stupeň bezpečnosti návodního svahu ale zůstává větší než vzdušního, jelikož návodní je velmi mírný (1:3,7).

IV. Zatěžovací stav

Pro tento zatěžovací stav platí stejné podmínky jako pro zatěžovací stav III. Návodní svah je příliš mírný na to aby-se porušoval vlivem výronu vody z tělesa hráze. Stupeň bezpečnosti pro tento stav mírně klesl a to na $M_{sf} = 1,28$.

Při všech porušeních se smyková plocha jevila jako válcová, což odkazuje na soudržné zeminy.

Nehomogenní hráze

Nehomogenní hráz se středním těsněním širokým, těsnicí část je jíl s nízkou plasticitou, stabilizační část je písek špatně zrněný.

I. Zatěžovací stav

Pro I. Zatěžovací stav vyšel stupeň bezpečnosti $M_{sf} = 1,67$. Dochází k malé poruše na vzdušní straně hráze, pouze v nesoudržném materiálu stabilizační části.

II. Zatěžovací stav

Pro tento zatěžovací stav vyšel stupeň bezpečnosti $M_{sf} = 1,51$. Splňuje tedy podmínku z normy ČSN 75 2410. Smyková plocha je již tvoří i v těsnicí části hráze a je složená, jelikož prochází soudržným i nesoudržným materiálem. Hráz se začíná porušovat i v těsnicí části, jelikož zde vlivem průsaku hrází narůstají pórové tlaky, které snižují její stabilitu.

III. Zatěžovací stav

Během tohoto zatěžovacího stavu se hráz chovala poměrně standardně. Původně se smyková plocha tvořila na vzdušní straně hráze, odtud se po určitém poklesu přemístila na návodní svah. Tento se vlivem výronů z těsnění hráze stal nestabilnější a postupem času klesal stupeň bezpečnosti na $M_{sf} = 1,26$, stalo se tak pro pokles hladiny po 7 dnech. Tato situace nastala kvůli tomu, že u středního těsnění širokého se těsnicí část podílí na stabilitě celé hráze. Jelikož má tato hráz strmější „návodní svah“ u těsnění než hráz homogenní mohlo nastat k porušení celého vyšního svahu vlivem výsaků. Jedná se vlastně o malou homogenní hráz se strmějšími sklony svahu, která je pouze přitížena nesoudržným materiálem a tento zvyšuje její stabilitu. Při tomto zatěžovacím stavu si můžeme názorně povšimnout poklesu hladiny v těsnicí části a části stabilizační. Zatímco v jádře, které má velmi nízkou hydraulickou vodivost, hladina vody téměř neklesá a vytvářejí se zde výronové plochy, ve stabilizační části klesá hladina vody poměrně rychle. Ve stabilizační části klesá hladina téměř tak rychle jako hladina v nádrži, jelikož má tato část oproti jádru několikanásobně větší hydraulickou vodivost.

IV. Zatěžovací stav

Pro tento zatěžovací stav platí to samé, co bylo napsáno pro III. zatěžovací stav. Pouze s tím rozdílem, že pokles hladiny je rychlejší a těsnicí část nemá tolik času na to reagovat na pokles hladiny v nádrži a tudíž se nejnižší stupeň bezpečnosti snížil na $M_{sf} = 1,22$.

Nehomogenní hráz se středním těsněním širokým, těsnicí část je písek hlinitý, stabilizační část je štěrk dobře zrněný.

I. Zatěžovací stav

Pro I. Zatěžovací stav vyšel stupeň bezpečnosti poměrně vysoký $M_{sf} = 1,94$. Na obrázku si můžeme povšimnout, že v hrázi se tvoří 2 smykové plochy ale pouze 1 je kinematicky určitá a to ta, která prochází celou hrází od návodního po vzdušní svah. Tato hráz vykazovala pro tento zatěžovací stav nejvyšší stupeň stability ze všech zkoumaných. Je to dáno především tím, že štěrk dobře zrněný má poměrně

velkou objemovou hmotnost a velký úhel vnitřního tření, takže se výborně hodí jako materiál stabilizační části hráze.

II. Zatěžovací stav

Pro tento zatěžovací stav vyšel stupeň bezpečnosti $M_{sf} = 1,76$. Opět největší hodnota ze všech vypočítaných pro tento zatěžovací stav. Smyková plocha prochází celou hrází pod drénem až na vzdušnou část hráze. Stupeň bezpečnosti se snížil v důsledku nárůstu pórových tlaků v těsnicím jádře.

III. Zatěžovací stav

Při tomto zatěžovacím stavu se hráz chovala opět podle představ. Při prvních poklesech hladiny v nádrži, se opět porušoval vzdušný svah, stupeň bezpečnosti zůstával stejný. Při poklesu za 5 dní se již porucha přesunula na návodní líc hráze, kde se vlivem výronové plochy z jádra snížil stupeň bezpečnosti až na $M_{sf} = 1,71$ pro pokles hladiny o 7 dní. U průběhu hladiny vody v hrázi, že platí to samé co u předchozí nehomogenní hráze se širokým těsněním a to že voda v těsnicí části klesá velmi pomalu oproti poklesu ve stabilizační části hráze.

IV. Zatěžovací stav

Zde je situace velmi podobná jako pro III. Zatěžovací stav pouze s rozdílem rychlejšího klesání vody v hrázi, které vedlo k nižšímu stupni bezpečnosti při poklesu 7m za 1den a to $M_{sf} = 1,49$.

Nehomogenní hráz se středním těsněním úzkým, těsnicí část je jíl s nízkou plasticitou, stabilizační část je písek špatně zrněný.

I. Zatěžovací stav

Pro I. Zatěžovací stav vyšel stupeň bezpečnosti $M_{sf} = 1,35$. Vytváří se malá smyková plocha na vzdušném svahu hráze. Tato smyková plocha je rovinná charakteristická pro nesoudržné zeminy.

II. Zatěžovací stav

U tohoto zatěžovacího stavu se stupeň bezpečnosti snížil na hodnotu $M_{sf} = 1,33$. Snížení je opět dáno průsakem vody hrází. U piezometrických výšek můžeme pozorovat, že hladina se v těsnění snížila velmi razantně. Na straně těsnění blíže k vzdušnému svahu se vytvoří výronová plocha, takto prosáklá voda je odvedena do drénu.

III. Zatěžovací stav

Pro tento zatěžovací stav se stupeň bezpečnosti téměř neměnil. Je zajímavé sledovat rozdíl oproti hrázi ze stejných materiálů, pouze se středním těsněním širokým. U hráze s úzkým těsněním toto těsnění neposkytuje takovou stabilitu jako těsnění široké. Tedy při prázdnění nádrže, i když se na návodní straně těsnění tvoří výronové plochy během poklesu, stabilizační část je zde natolik silná aby zabránila usmyknutí návodního svahu. Naproti tomu vzdušný svah je stále strmější a vykazuje známky porušení rovinnou smykovou plochou, jelikož se jedná o nesoudržný materiál. Nejnižší stupeň bezpečnosti zde vyšel pro pokles hladiny za 5 a 6 dní a to $M_{sf} = 1,31$.

IV. Zatěžovací stav

Zde si můžeme povšimnout stejného chování jako u předešlého zatěžovacího stavu, stupeň bezpečnosti mírně klesá k $M_{sf} = 1,32$. Toto klesání je způsobeno především větším šokem během rychlého poklesu hladiny vody v nádrži. To že zde vyšel stupeň bezpečnosti o 0,01 vyšší, než u předcházejícího zatěžovacího stavu je dáno především zaokrouhlováním. Stupně bezpečnosti pro oba zatěžovací stavy vycházely téměř totožně.

Při porušování hrází z nehomogenních materiálů bylo vidět hned několik rozdílů oproti hrázím homogenním. Jedním z rozdílů je především tvar smykových ploch. Tyto plochy jelikož procházejí vícero druhy materiálů, mají složený tvar z rovinných pro nesoudržné zeminy a válcových pro zeminy soudržné. Taktéž je zde rozdíl počítat stupeň bezpečnosti pro hráz s širokým těsněním, a pro hráz s úzkým těsněním. Zatímco u širokého těsnění, se toto podílí na stabilitě celé hráze, u úzkého poskytuje stabilitu pouze stabilizační část. Velice názorně je to vidět na smykových plochách, kde u širokého vznikaly složené smykové plochy, zatímco u úzkého rovinné. U těchto případů bylo také velice názorně vidět, jak se chovají materiály různých propustností během poklesu hladiny v nádrži. Zatímco v materiálech s nízkou propustností se hladiny téměř nehnuly, materiály s vysokou propustností velmi rychle reagovaly na pohyb hladiny v nádrži a hladiny zde klesaly téměř souběžně.

Bezpochyby by bylo zajímavé sledovat, jak se budou chovat především homogenní hráze v čase po rychlém prázdňení, kdy by se pozvolna hladina vody v hrázi dostávala do normálu. Zda by se snižoval stupeň bezpečnosti či nikoli.

Další zajímavou studií by bezpochyby mohla být studie nalezení takového sklonu hráze, pro který by se stupeň bezpečnosti rovnal 1. Naskytla by se tak lepší představa o tom, jak moc pro jednotlivé materiály klesá stupeň bezpečnosti souběžně s prudším svahem návodního nebo vzdušního svahu.

Bohužel posuzování těchto nádrží podle stupňů bezpečnosti je poněkud zobecněné. Stupně bezpečnosti, které jsou obsaženy v normě ČSN 75 2410, se do ní dostaly z normy pro velké sypané hráze ČSN 75 2310. Je tedy na zváženu, zda posuzovat tyto malé vodní nádrže podle stejných stupňů bezpečnosti jako nádrže velké. Malé nádrže jsou většinou až IV. kategorie kdy nehrozí tak velké nebezpečí osobám i majetku v porovnání s nádržemi kategorie I. Nabízí se otázka, proč nevyužívat určité dílčí součinitele pro stupně bezpečnosti, které by přiřazovaly vyšší čísla stupňů bezpečnosti vodním dílům I. kategorie a nižší ostatním kategoriím.

S výsledky diplomové práce panuje z mé strany spokojenost. Bylo velmi zajímavé pozorovat chování jednotlivých hrází během zatěžovacích stavů, především při prázdňení. Při tomto zatěžovacím stavu mě některé hráze překvapily tím, že se porušovaly pouze na vzdušné straně a to i pro rychlé prázdňení. Toto chování jsem zpočátku vůbec neočekával, ale jeho příčiny byly po lepším pochopení problematiky a konzultacích vysvětlitelné. Musím se zmínit, že výsledky stupňů bezpečnosti, kterých jsem v parametrických studiích docílil, byly velkou měrou ovlivněny zvolenými parametry zemin. Pro jinak zvolené parametry zemin by pravděpodobně stupně bezpečnosti vyšly rozdílně.

7 ZDROJE

- BEAR, J. VERRUIJT, A. *Modeling groundwater flow and Polution*. 1987.
- BROŽA, J. KRATOCHVÍL, J. PETER, P. VOTRUBA, L. *Přehrady*. SNTL/ALFA. Praha. 1987.
- BROŽOVSKÝ, J. MATERNA, A. *Základy matematické teorie pružnosti*. Plzeň. 2012
- COURANT, R., FRIEDRICHS, K., LEWY, H. *On the Partial Difference Equations of Mathematical Physics*, (1928), 1967
- BRINKGREVE, R.B.J., KUMARSWAMY, S., SWOLFS, W. M. *Plaxis General informaions*. 2016.
- ČSN 73 6824 *Nízké sypané přehrady: Malé vodní nádrže*. Praha, 1979.
- ČSN 73 1001 *Zakládání staveb: Základová půda pod plošnými základy*. Praha, 1988.
- ČSN 75 2310 *Sypané hráze*. Praha, 2006.
- ČSN 75 2410 *Malé vodní nádrže*. Praha, 2011.
- ČSN EN 1997-1. 2006 Eurokód 7: *Navrhování geotechnických konstrukcí*. Část 1: Obecná pravidla.
- DESIGN. *Design of small dams: A water Resources Technical Publication*, 1987. 3.rd ed. Washington DC: US dept of the Interior Bureau of Reclamation,
- DUNCAN, J. STEPHEN, M. WRIGHT, G. *Soil strength and slope stability*. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, 2005.
- FELL, R. *Geotechnical engineering of dams, 2015. 2nd edition*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN 9781138000087.
- FUSEK, M. HALAMA, R. *MKP a MHP*. Ostrava, 2011.
- GOLDIN, A. RASSKAZOV, L. *Design of earth dams*, 1992. Rotterdam u.a: Balkema,
- CHALMOVSKÝ, J. *Základy matematického modelování v geotechnice s využitím programu Plaxis*, 2014. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební,
- HRUBEŠOVÁ, E. ALDORF, J. LUŇÁČKOVÁ, B. *Determinující faktory stabilitní analýzy svahu založené na metodě redukce pevnostních charakteristik* [online]. Ostrava, 2006 [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: <https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjVvMCkmOjLAhVCUhQKHYY3bBhsQFggiMAA&url=http%3A%2F%2Ffast10.vsb.cz%2Fhrubeso%2Fprezentace%2520SSRM.ppt&usg=AFQjCNFmWIyk47GhaNHIJ-aBqGZ2IDntXQ&cad=rja>. Prezentace.
- KÉZDI, Á. 1964. *Bodenmechanik. Band 2. Verlag für Bauwesen*, Berlin
- KOŘÍNEK, R. *Mechanika hornin a zemin* [online]. Brno [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://www.geotechnici.cz/wp-content/uploads/2012/08/MHZ-05.pdf>
- KOLÁŘ, V. KRATOCHVÍL, J. LEITNER, F. ŽENÍŠEK, A. *Výpočet plošných a prostorových konstrukcí metodou konečných prvků*, 1979. Praha: SNTL,

LEWIS, B. *Small Dams: Planning, Construction, and Maintenance*, 2014. Boca Raton: CRC Press, ISBN 9780415621113.

MAŠÍN, D. *Přednášky pro obor geotechnologie*.

MYSLIVEC, A. – EICHLER, J.- JESENÁK, J. 1970. *Mechanika zemin*, SNTL Praha.

ONLINE NÁPOVĚDA: Kruhová smyková plocha. *Fine.cz* [online]. Praha [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://www.fine.cz/napoveda/geo5/cs/kruhova-smykova-plocha-01/>

ONLINE NÁPOVĚDA: Kruhová smyková plocha. *Fine.cz* [online]. Praha [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://www.fine.cz/napoveda/geo5/cs/kruhova-smykova-plocha-01/>

PLÁNIČKA, F. ZAJÍČEK, M. ADÁMEK, V. *Napjatost a hypotézy pevnosti*.

ŘÍHA, J. *Úvod do rizikové analýzy přehrad*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008.

TANČEV, L. *Dams and appurtenant hydraulic structures*, 2014. 2nd edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN 113800006X.

ŠIMEK, J. JESENÁK, J. EICHLER, J. VANÍČEK, I. 1990. *Mechanika zemin*, SNTL Praha

VOTRUBA, L. BROŽA, V. KAZDA. I. *Přehrady*. Praha, 1978.

WEIGLOVÁ, K. *Mechanika zemin*. Brno, 2005.

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

u	– Posunutí
ε	– Deformace
σ	– Normálové napětí
τ	– Smykové napětí
E	– Modul pružnosti materiálu
ν	– Poissonův součinitel
γ	– Zkosení
I_1	– I. Invariant napětí
I_2	– II. Invariant napětí
I_3	– III. Invariant napětí
ε_p	– Plastické přetvoření
ε_c	– Creepové přetvoření
σ_1, σ_3	– Hlavní napětí
σ_{ef}	– Efektivní napětí
u	– Tlak vody v pórech zeminy
SF	– Stupeň bezpečnosti
$F_{aktivní}$	– Aktivní síly
$F_{pasivní}$	– Pasivní síly
c	– Soudržnost
φ	– Úhel vnitřního tření
$u = \{u, v, w\}^T$	– Vektor posunutí
$\varepsilon = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}\}^T$	– Vektor poměrných přetvoření
$\sigma = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}\}^T$	– Vektor napětí

SEZNAM TABULEK

2.1 Srovnání metod mezní rovnováhy.....	29
3.1 Vhodnost zemin pro různé zóny hrází dle ČSN 75 2410.....	38
3.2 Orientační hodnoty sklonů svahů hrází MVN dle ČSN 75 2410.....	40
4.1 Sklony svahů vybraných homogenních hrází.....	42
4.3 Sklony svahů vybraných nehomogenních hrází.....	43
4.4 Srovnání vlastností zemin de ČSN 75 2410 a ČSN 73 1001	46
4.5 Srovnání vlastností zemin de ČSN 75 2410 a ČSN 73 1001	46
4.6 Srovnání vlastností zemin de ČSN 75 2410 a ČSN 73 1001	47
4.7 Srovnání vlastností zemin de ČSN 75 2410 a ČSN 73 1001	47
4.8 Srovnání vlastností zemin de ČSN 75 2410 a ČSN 73 1001	48
4.9 Srovnání vlastností zemin de ČSN 75 2410 a ČSN 73 1001	48
4.10 Srovnání vlastností zemin dle ČSN 75 2410 a ČSN 73 1001	49
4.11 Materiálové vlastnosti zemin použitých během výpočtu	50
5.1 Vypočtené stupně bezpečnosti pro vybrané varianty hrází.....	57

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1 Napětí v bodě [Brožovský, 2012]	13
2.2 Změna průřezu při působení síly [Wikipedie].....	14
2.3 Mohrova kružnice [Srinivas, 2015].....	18
2.4 Úplný Mohrův diagram [Wikipedie, 2009].....	19
2.5 Mohr-Coulombovo zobrazení [Weiglová, 2005]	23
2.6 Coulombova přímka pro různé typy zemin [Weiglová, 2005].....	24
2.7 Mohrovy kružnice totálního a efektivního napětí [Weiglová, 2005]	26
2.8 Výpočetní schéma Bishopovy metody [Online nápověda, www.fine.cz].....	28
2.9 Výpočetní schéma Spencerovy metody [Online nápověda, www.fine.cz]	29
2.10 Redukce parametrů smykové pevnosti.....	30
2.11 Redistribuce napětí a tvorba smykové plochy.....	31
2.12 Patnácti a šesti uzlové body společně s vytvořenými stress pointy [Chalmovský, 2014]	33
2.13 Charakteristika Mohr-Coulombova modelu [Chalmovský, 2014].....	34
2.14 Prostorové zobrazení Mohr-Coulombovy křivky v prostoru hlavních napětí [Mašín]....	35
2.15 Schematické srovnání průběhu ESP a TSP pro typy chování materiálu [Chalmovský, 2014].....	36
3.1 Vzorový řez homogenní hrází dle ČSN 75 2410 [ČSN 75 2410, 2011].....	39
3.2 Vzorový řez nehomogenní hrází dle ČSN 75 2410 [ČSN 75 2410, 2011]	39
4.1 Vzorová geometrie homogenní hráze	44
4.2 Vzorová geometrie nehomogenní hráze.....	44
4.3 I. Zatěžovací stav - Prázdná nádrž	51
4.4 II. Zatěžovací stav – Plná nádrž, hladina 1m pod korunou hráze ustálené rovnoměrné proudění.....	52
4.5 III. Zatěžovací stav – Pokles hladiny vody v nádrži. Hladina klesá o 1m za den až na úroveň 1m. To znamená pokles o 7m za 7dní.....	52
4.6 IV. Zatěžovací stav – Rychlý pokles hladiny vody v nádrži. Hladina klesá o 7m za jeden den.	52
4.7 Okrajové podmínky výpočtu.....	53
4.8 Graf parametrické studie vývoje stupně bezpečnosti.....	54

SEZNAM PŘÍLOH

- | | |
|---------------|---|
| Příloha 1. 1. | Vzorový řez hrází, homogenní hráz – štěrk hlinitý |
| Příloha 1. 2. | Matematický model, homogenní hráz – štěrk hlinitý |
| Příloha 1. 3. | Piezometrické výšky vody v hrázi – homogenní hráz štěrk hlinitý |
| Příloha 1. 4. | Utvořené smykové plochy - homogenní hráz štěrk hlinitý |
| | |
| Příloha 2. 1. | Vzorový řez hrází, homogenní hráz – písek hlinitý |
| Příloha 2. 2. | Matematický model, homogenní hráz – písek hlinitý |
| Příloha 2. 3. | Piezometrické výšky vody v hrázi, homogenní hráz - písek hlinitý |
| Příloha 2. 4. | Utvořené smykové plochy, homogenní hráz - písek hlinitý |
| | |
| Příloha 3. 1. | Vzorový řez hrází, homogenní hráz – štěrk jílový |
| Příloha 3. 2. | Matematický model, homogenní hráz – štěrk jílový |
| Příloha 3. 3. | Piezometrické výšky vody v hrázi, homogenní hráz - štěrk jílový |
| Příloha 3. 4. | Utvořené smykové plochy, homogenní hráz - štěrk jílový |
| | |
| Příloha 4. 1. | Vzorový řez hrází, homogenní hráz – písčitý jíl |
| Příloha 4. 2. | Matematický model, homogenní hráz – písčitý jíl |
| Příloha 4. 3. | Piezometrické výšky vody v hrázi, homogenní hráz - písčitý jíl |
| Příloha 4. 4. | Utvořené smykové plochy, homogenní hráz - písčitý jíl |
| | |
| Příloha 5. 1. | Vzorový řez hrází, homogenní hráz – jíl s nízkou plasticitou |
| Příloha 5. 2. | Matematický model, homogenní hráz – jíl s nízkou plasticitou |
| Příloha 5. 3. | Piezometrické výšky vody v hrázi, homogenní hráz - jíl s nízkou plasticitou |
| Příloha 5. 4. | Utvořené smykové plochy, homogenní hráz - jíl s nízkou plasticitou |
| | |
| Příloha 6. 1. | Vzorový řez hrází, nehomogenní hráz – široké těsnění CI - SP |
| Příloha 6. 2. | Matematický model, nehomogenní hráz – široké těsnění CI - SP |
| Příloha 6. 3. | Piezometrické výšky vody v hrázi, nehomogenní hráz - široké těsnění CI - SP |
| Příloha 6. 4. | Utvořené smykové plochy, nehomogenní hráz - široké těsnění CI - SP |

- Příloha 7. 1. Vzorový řez hrází, nehomogenní hráz – široké těsnění SM - GW
- Příloha 7. 2. Matematický model, nehomogenní hráz – široké těsnění SM - GW
- Příloha 7. 3. Piezometrické výšky vody v hrázi, nehomogenní hráz - široké těsnění SM - GW
- Příloha 7. 4. Utvořené smykové plochy, nehomogenní hráz - široké těsnění SM - GW
-
- Příloha 8. 1. Vzorový řez hrází, nehomogenní hráz – štíhlé těsnění CI - SP
- Příloha 8. 2. Matematický model, nehomogenní hráz – štíhlé těsnění CI - SP
- Příloha 8. 3. Piezometrické výšky vody v hrázi, nehomogenní hráz - štíhlé těsnění CI - SP
- Příloha 8. 4. Utvořené smykové plochy, nehomogenní hráz - štíhlé těsnění CI - SP